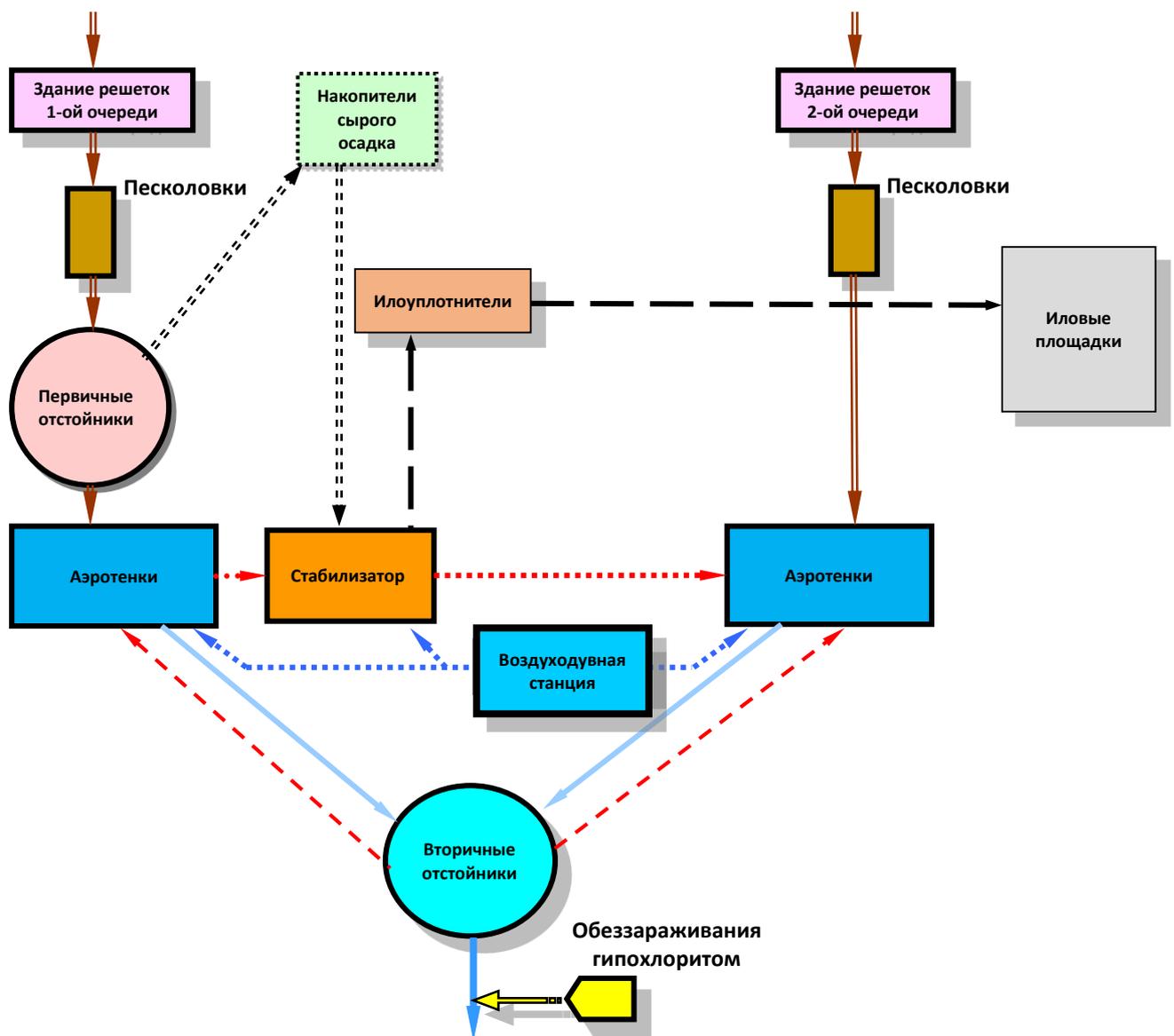


Ю. Г. Шипулин, М. И. Махмудов

КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД



ТАШКЕНТ-2018

**Министерство высшего и среднего специального
образования Республики Узбекистан**

**Ташкентский Государственный технический университет
им. И. А. Каримова**

Бухарский инженерно-технологический институт

Ю. Г. Шипулин, М. И. Махмудов.

**КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В СИСТЕМАХ
ОЧИСТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД**

(Монография)

ТАШКЕНТ-2018

УДК 628.34.001.57

ББК 39.279

Ш-62

Ш-62 Ю. Г. Шипулин, М. И. Махмудов. **Контроль и управление параметров технологических сред в системах очистки и использования производственных сточных вод. (Монография).** – Т.: «Fan va texnologiya», 2018, 216 стр.

ISBN 978-9943-11-728-00

В монографии приведены результаты анализа устройств контроля и управления в системах очистки сточных вод промышленных предприятий. Показано, что возрастающие требования к качеству эксплуатации очистных сооружений и устройств расширяют круг задач, решаемых с позиции автоматического управления, применения методов математического моделирования и оптимизации технологических процессов. Определено, что практическое использование оптимизационных задач, методов синтеза и создания системы управления очистными сооружениями связано с возможностями оперативного измерения технологических параметров. Анализ технологических процессов показывает, что требуется большое количество первичных преобразователей (датчиков), анализаторов, сложных программных средств, современной микропроцессорной техники. Авторы показывают, что разработка новых приборов для измерений технологических параметров в процессе очистки сточных вод требует новых средств коммуникаций, функциональных устройств, модемов, коммутаторов, мультиплексоров, программного обеспечения для связи с компьютером.

Монография предназначена для научных работников, преподавателей, студентов и магистров ВУЗов, а также для инженерно–технических работников, занимающихся разработкой и применением систем контроля и управления в технологических системах очистки и использования производственных сточных вод.

Ответственный редактор: Азимов Р. К. - доктор технических наук, профессор.

Рецензенты: Гулямов Ш.М. - д.т.н., проф. (Ташкентский Государственный технический университет);
Джураев Х.Ф. - д.т.н., проф. (Бухарский инженерно-технологический институт).

Рекомендовано к печати по решению Совета Ташкентского Государственного технического университета им. И. А. Каримова от 20 октября 2017 года и Бухарского инженерно-технологического института 07 августа 2017 года.

ISBN 978-9943-11-728-00

© изд-во «Fan va texnologiya», 2018;

© Ташкентский Государственный технический университет, 2018;

© Бухарский инженерно-технологический институт, 2018.

Оглавление

Введение.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД	11
1.1. Анализ систем водоснабжения и водоотведения промышленных предприятий.....	11
1.2. Определение необходимой степени очистки производственных сточных вод.....	16
1.3. Схемы очистки и использования сточных вод территориально-производственных комплексов.....	25
1.4. Определение уровней автоматизации процесса очистки сточных вод	29
1.5. Ранжировка элементов производственных структур очистных сооружений	34
1.6. Технический регламент и автоматизация технологических процессов очистке сточных вод (на примере Саларской станции аэрации ГУП «Сувсоз»)	38
ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД	47
2.1. Общие вопросы контроля и управления технологическими режимами очистки и использования производственных сточных вод	48
2.2. Выбор и обоснование технических средств автоматизации	51
2.3. Методы и технологические схемы контроля в системах очистки сточных вод.....	58
2.4. Особенности процесса биохимической очистки с точки зрения задач управления	68
2.5. Оптимальное согласование характеристик аэротенков и вторичных отстойников	73
2.6. Значения амплитудно-частотных колебаний параметров сточных вод на выходе из очистных сооружений	79
2.7. Экспериментальные методы изучения объектов.....	84
биологической очистки сточных вод.....	84
2.8. Метрологические вопросы выбора и применения рН-метров и иономеров	88
2.8.1. Определение значения и погрешности рН	92

ГЛАВА III. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ОСНОВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД	98
3.1. Анализ систем автоматической стабилизации процесса нейтрализации промышленных сточных вод	98
3.2. Система адаптивного субоптимального управления процессом механического обезвоживания осадков сточных вод	102
3.3. Математическая модель процесса биологической очистки сточных вод	108
3.4. Математическое моделирование и управление качеством очистки сточных вод.....	115
3.5. Алгоритмы коррекции динамической погрешности средств измерений систем очистки и использования производственных сточных вод	120
3.6. Алгоритмы динамической фильтрации с учетом инерционности измерительного устройства систем очистки и использования производственных сточных вод.....	125
3.7. Алгоритмы сглаживания измерительной информации в системах очистки и использования сточных вод	131
3.8. Алгоритмы оценивания параметров в многоканальных измерительных системах очистки и использования производственных сточных вод	135
3.9. Алгоритмы множественной идентификации и фильтрации измерений	141
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД	145
4.1. Физические и математические модели оптоэлектронных преобразователей на основе полых световодов для систем контроля параметров воды.....	145
4.2. Оптоэлектронный преобразователь с полым световодом и кольцевым приемником излучения.....	154
4.3. Экспериментальные исследования оптоэлектронных преобразователей с полыми световодами.....	157
4.4. Анализ источников погрешностей оптоэлектронных преобразователей с полыми световодами.....	162
4.5. Анализ надежности приборов и устройств в системах контроля очистки и использования производственных сточных вод	167
ГЛАВА 5. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД.....	173

5.1. Микропроцессорное устройства для измерения и регистрации скорости и расхода воды в очистных сооружениях (МРВ).....	173
5.2. Автоматическая многофункциональная система, контроля и регистрации химического состава водных сред.....	177
5.2.1. Портативный микропроцессорный многофункциональный измеритель рН и температуры.....	180
5.3. Автоматизированная система потенциометрического титрования.....	183
5.4. Микропроцессорный измеритель концентрации активного ила	188
5.5. Многофункциональное микропроцессорное устройство контроля уровня воды в аэротенках очистных сооружений	192
5.6. Микропроцессорное устройство управления аварийными выбросами в очистных сооружениях.....	198
5.7. Автоматическое устройство защиты и отключения электродвигателей в очистных сооружениях.....	201
ЛИТЕРАТУРА	205

Введение

Охрана окружающей природной среды и рациональное использование природных ресурсов приобретают в настоящее время исключительное значение. Актуальность этой проблемы подтверждена принятыми правительством Республики Узбекистан рядом законодательных актов, постановлений и проектов [1-4].

В этих постановлениях намечены мероприятия, направленные на защиту водоемов от загрязнения и истощения, внедрение маловодных и безводных технологических процессов, разработку новых методов, а также сооружение по очистке производственных и городских сточных вод.

Возросшие требования к качеству эксплуатации очистных сооружений и устройств выдвинули необходимость значительного расширения круга задач, решаемых с позиций автоматизированного управления на базе достижений теории автоматического управления, методов математического моделирования и оптимизации технологических процессов. Практически все современные очистные сооружения состоят из большого числа разнотипных машин аппаратов, связанных между собой сложной технологической схемой [23]. Характер этих связей может быть весьма различным: сточные воды, сырой и избыточный ил, суспензии и сброженные осадки, обрабатываемые одних аппаратах, поступают в следующие по ходу процесса сооружения; побочные продукты очистки, получаемые на одном участке системы, утилизируются на другом; исходные промежуточные и конечные материальные потоки распределяются между различными потребителями. Задача автоматизации управления и контроля параметров технологических сред такими природоохранными системами состоит не только в том, чтобы поддерживать наиболее эффективные экономические и экологические режимы в каждом аппарате или сооружении в отдельности, но и в том, чтобы эффективно контролировать и измерять основные технологические параметры, и тем самым, установить между элементами технологической схемы связи, обеспечивающие оптимальную работу всей системы в целом. Специфические особенности технических схем, трудности контроля управления очистными сооружениями долгое время не позволяли

автоматизировать эти объекты на базе известных методов [18]. Поэтому весьма важной является разработка теоретической и методологической базы автоматизированных комплексов с учетом особенностей структуры и взаимосвязей оборудований свойств очищаемых потоков и побочных продуктов очистки и обусловленных этими свойствами особенностей технологического контроля.

В последние годы все больше интерес вызывает контроль состава промышленных сточных вод. При этом помимо других ограничений и требований промышленные сточные воды должны иметь рН в узком диапазоне значений; кроме того, они должны быть нейтрализованы до того, как выйти за пределы промышленного предприятия. Это требование усложняется неопределенными и непрогнозируемым составом потоков, выходящих из предприятия с множеством производственных установок.

Структура систем управления очистными сооружениями и системами в значительной степени обуславливается свойствами потоков обрабатываемых осадков и конструктивными особенностям оборудования. Необходимость создания АСУ ТП связана с тем, что принципы управления очистными сооружениями, хотя они и основываются на фундаментальных положениях общей теории управления, настолько тесно связаны со спецификой обрабатываемых потоков городских и производственных сточных вод и соответственно, управляемых объектов, что разработка каждой новой автоматизированной системы оказывается в значительной степени оригинальной. Практическое использование оптимизационных задач, методов синтеза и создания систем управления очистными сооружениями определяется возможностями оперативного измерения технологических параметров [20].

Известно, что на основе типичных процессов физико-химической очистки промышленных сточных вод, в основе которых лежат реакции нейтрализации, осаждения металлов, окисления-восстановления, коагуляции и некоторые другие.

Среди сложной совокупности научно-технических проблем, связанных с решением этой задачи, проблема устойчивого, надежного поддержания заданных параметров качества воды на выходе химико-биологической очистки является центральной, поскольку проскоки и

выносы па выходе очистных сооружений в этом случае незамедлительно сказываются на состоянии основного производства, нарушая его технологию и приводя к зарастанию живых сечений коммуникаций систем оборотного водоснабжения.

Привлечение к решению задач оптимизации методов линейного, нелинейного и динамического программирования с реализацией решения на ЭВМ, позволяет с высокой точностью определять глобальный экстремум целевой функции и, следовательно, оптимальные уровни значений технологических и конструктивных параметров сооружений очистки природных и сточных вод [28].

Разработка математических моделей и решение задач оптимизации процессов очистки природных и сточных вод требует выполнения следующих этапов работы:

1. Подготовку технологических и экономических данных для статической обработки;
2. Построение математических моделей процессов с определением коэффициентов корреляции функций и основных технологических и конструктивных параметров;
3. Формирование функции – критерия оптимальности, математический анализ целевой функции, выбор методов поиска глобального экстремума функции;
4. Составление программы расчета и реализации решения задачи на ЭВМ.

Решения этих задач в значительной мере зависят от качества подготовки технологических методов и приборов, достоверности данных информации, лабораторных и производственных испытаний и процессов очистки производственных сточных вод.

Свойства обрабатываемых потоков воды, ила и осадков весьма неблагоприятны для реализации автоматических измерений и управляющих воздействий. В этих условиях надежность, живучесть и энергоёмкость подсистем управления материальными потоками во многом определяют эксплуатационные характеристики всей интегрированной АСУ ТП.

Анализ технологических процессов при очистке сточных вод показывает сложности процессов их контроля и управления, что требуется большое количество первичных преобразователей,

анализаторов, сложных программных средств, современной микропроцессорной техники.

Внедрение и стандартную конструкцию первичных преобразователей микропроцессора, обеспечивает улучшения метрологических характеристик, расширений функциональных возможностей и диагностирования приборов.

Актуальной и нерешенной остается проблема совершенного обнаружения сверхвысоких загрязнений поступающие в очистных сооружениях в результате аварийных выбросов, загрязняющих веществ и прогнозирования развития ситуации.

Решение вышеуказанных проблем возможно лишь путем создания эффективной технологии автоматизированного контроля переноса загрязняющих веществ в резервные аэротенки. Система контроля реализующиеся такую технологию, должна имеет единую методологию и современные технические средства оперативного получения, обработки и анализа информации о состоянии контролируемых водных объектов [42].

Разработка новых приборов для измерений технологических параметров в процесс очистки сточных вод требует разработки новых средств коммуникации, функциональные устройства: модемы, коммуникаторы, мультиплексоры, программное обеспечение для связи с компьютером.

Однако, до настоящего времени не исследована зависимость эффективности управления очистными сооружениями от структуры подсистем и способов управления материальными потоками, вследствие чего отсутствуют научно-обоснованные методы синтеза этих подсистем. Наличие большого числа внешних возмущающих воздействий процессов водоочистки (колебаний расхода и состава обрабатываемых потоков, температуры, давления и др.) а также внутренних возмущений (не стационарность характеристик оборудования), с одной стороны и отсутствие надежных средств контроля основных параметров процесса с другой, приводит к необходимости создания эффективных систем контроля параметров технологических сред в системах очистки и использования производственных сточных вод. Разработка и создание эффективных систем автоматического контроля и измерения параметров технологических сред в практике автоматизации процессов

водоочистных сооружений позволит обеспечить оптимальные режимы эксплуатации основного оборудования в условиях дрейфа их характеристик и колебаний технологических параметров. Таким образом, высокие требования, предъявляемые к качеству функционирования современных очистных сооружений и систем, приводят к необходимости разработки и практической реализации приборов и систем контроля основных технологических параметров процессов водоочистки, позволяющих осуществлять анализ, синтез и оптимизацию процессов управления, обеспечить работоспособность систем управления рассматриваемым процессом при изменении статических и динамических характеристик объекта, повысить надёжность их работы.

В этой связи разработка и создание приборов и системы мониторинга параметров технологических сред в системах очистки и использования производственных сточных вод приобретает весьма важное значение.

При таком комплексном подходе экономический эффект использования современных интеллектуальных измерительных микропроцессорных систем многократно увеличит отдачу от вложений в основные средства.

Приобретение за границей сложных систем для анализа сточных вод, с использованием валютных средств является не рациональным способом. Для повышения эффективности решения задач, необходимо использовать и внедрять технические, алгоритмические и программные средства с использованием современных микропроцессорных систем обеспечивающий точность для контроля и управления технологическими процессами очистки сточных вод.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

1.1. Анализ систем водоснабжения и водоотведения промышленных предприятий

Охрана окружающей природной среды и рациональное использование природных ресурсов приобретают в наши дни исключительное значение.

Принимаются необходимые меры для охраны и научно обоснованного, рационального использования земли и ее недр, водных ресурсов, растительного и животного мира, для сохранения в чистоте воздуха и воды, обеспечения воспроизводства богатств и улучшения окружающей человека среды. Санитарное состояние водоемов является одним из аспектов социально-экономического развития различных районов нашей страны. При современных масштабах и темпах развития производительных сил должны предъявляться повышенные требования к вопросам, связанным с охраной окружающей среды и рациональным использованием природных ресурсов, так как речь, по существу, идет о здоровье людей и о бережном хозяйском подходе к национальному богатству страны; более того, это вопросы, от решения которых зависят условия жизни последующих поколений [29, 77, 79].

Бурное развитие промышленности вызывает необходимость в предотвращении отрицательного воздействия производственных сточных вод на водоемы. В связи с чрезвычайным разнообразием состава, свойств и расходов сточных вод промышленных предприятий необходимо применение специфических методов, а также сооружений по локальной, предварительной и полной очистке этих вод. Одним из основных направлений научно-технического прогресса является создание малоотходных и безотходных технологических процессов. В области очистки сточных вод таким направлением является разработка водоотводящих систем с минимальным сбросом сточных вод в водоем или без сброса — бессточных [35].

В составе инженерных коммуникаций каждого промышленного предприятия имеется комплекс водоотводящих сетей и сооружений, с помощью которых осуществляется отведение с территории предприятия отработавших вод (если дальнейшее использование их невозможно по

техническим условиям либо нецелесообразно по технико-экономическим показателям), а также сооружений по очистке сточных вод и извлечению из них ценных веществ и примесей [36].

Переход на бессточные системы или системы с минимальным сбросом сточных вод может быть осуществлен путем многократного использования отработавших вод и замены водяного охлаждения на воздушное. При переводе ряда отраслей промышленности на безводные технологические процессы исключается образование сточных вод.

При проектировании очистных сооружений необходимо учитывать состав и свойства производственных сточных вод, нормы водоотведения на единицу продукции, условия выпуска производственных сточных вод в городскую водоотводящую сеть и водоемы, а также необходимую степень их очистки [78].

Все многообразие встречающихся на практике систем водоснабжения можно классифицировать по следующим основным признакам [79]:

- по виду использования природных источников-водопроводы, получающие воду из поверхностных источников (речные, озерные и т.д.), подземных источников (артезианские, родниковые и т.д. и смешанного питания (различные виды водоисточников);

- по назначению – коммунальные (городов и поселков) железнодорожные, сельскохозяйственные, производственные (подразделяются по отраслям промышленности);

- по территориальному признаку – локальные (одного объекта) и групповые (или районные);

- по способу подачи воды – самотечные (гравитационные) и с механической подачей воды (с помощью насосов);

- по кратности использования потребляемой воды – системы прямоточные, последовательные, с оборотом воды.

Для разработки рациональной схемы водоотведения и оценки возможности повторного использования производственных сточных вод необходимо учесть их состав и режим водоотведения. При этом требуется провести анализ физико-химических показателей сточных вод и режим поступления в водоотводящую сеть не только общего стока промышленного предприятия, но и сточных вод из отдельных цехов, а при необходимости от отдельных аппаратов. Сточные воды, отводимые с территории промышленных предприятий, по своему составу могут быть разделены на три вида [37]:

1. Производственные — использованные в технологическом процессе или получающиеся при добыче полезных ископаемых (угля, нефти, руд и т. п.);

2. Бытовые — от санитарных узлов производственных и непроизводственных корпусов, и зданий, а также от душевых установок, имеющих на территории промышленных предприятий;

3. Атмосферные — дождевые и от таяния снега.

Производственные сточные воды делятся на две основные категории: загрязненные и незагрязненные (условные чистые)

Загрязненные производственные сточные воды содержат различные примеси и подразделяются на три группы:

1. Загрязненные преимущественно минеральными примесями (предприятия металлургической, машиностроительной, рудо- и угледобывающей промышленности; заводы по производству минеральных удобрений, кислот, строительных изделий и материалов и др.);

2. Загрязненные преимущественно органическими примесями (предприятия мясной, рыбной, молочной, пищевой, целлюлозно-бумажной, химической, микробиологической промышленности; заводы по производству пластмасс, резины и др.);

3. Загрязненные минеральными и органическими примесями (предприятия нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, текстильной, легкой, фармацевтической промышленности; заводы по производству консервов, сахара, продуктов органического синтеза, бумаги, витаминов и др.).

По концентрации загрязняющих веществ производственные сточные воды разделяются на четыре группы: 1—500, 500—5000, 5000—30 000, более 30 000 мг/л.

Производственные сточные воды могут различаться по физическим свойствам загрязняющих их органических продуктов (например, по температуре кипения: менее 120, 120—250 и более 250 °С).

По степени агрессивности эти воды разделяют на слабоагрессивные (слабокислые с $\text{pH}=6\div 6,5$ и слабощелочные с $\text{pH}=8\div 9$), сильноагрессивные (сильнокислые с $\text{pH}<6$ и сильнощелочные с $\text{pH}>9$) и неагрессивные (с $\text{pH}=6,5\div 8$) [91-93].

Кроме того, загрязненные производственные сточные воды классифицируются по содержанию токсичных и опасных в эпидемиологическом отношении веществ и примесей, а также по наличию концентрированных отходов производства, не подлежащих спуску в водоотводящую сеть.

Необходимость создания замкнутых систем производственного водоснабжения определяется тремя основными факторами:

- дефицитом воды;
- истощением ассимилирующей способности водных объектов,

- предназначенных для приема сточных вод;
- экономическими преимуществами по сравнению с прямоточными системами водоснабжения и очисткой сточных вод перед сбросом их в водные объекты до требований, предъявляемых водохранным контролем.

На промышленных предприятиях применяют три основные схемы оборотного водоснабжения (рис.1.1):

- в схеме с охлаждением воды (а) она является теплоносителем и в процессе использования не загрязняется, а только нагревается; перед повторным использованием ее охлаждают в прудах-охладителях, брызгальных бассейнах, башенных и вентиляторных градирнях;
- в схеме с очисткой воды (б) она в производстве не нагревается, но загрязняется, перед возвращением в технологический процесс подвергается очистке. В зависимости от характера содержащихся в воде примесей и требований к качеству оборотной воды могут применяться различные методы очистки и их комбинации;
- третья схема с очисткой и охлаждением (в) оборотной воды, при возвращении в производство подвергается очистке и охлаждению.

Режим водоотведения. При эксплуатации водоотводящих сетей и очистных сооружений необходимо знать не только суточное количество сточных вод, но и режим их поступления по часам суток, иначе говоря, часовой график притока сточных вод. Производственные сточные воды в течение смены могут поступать равномерно и неравномерно. На ряде производств химической, легкой, текстильной, фармацевтической, пищевой и других отраслей промышленности происходят залповые поступления высококонцентрированных и высокотоксичных сточных вод, при этом периодичность сброса может быть 1 раз в смену, в сутки, в неделю. Режим спуска производственных сточных вод целиком определяется регламентом технологического процесса в отдельных цехах и на промышленном предприятии в целом [40].

Эффективность использования воды на промышленных предприятиях функционально определять по трем показателям.

1. Техническое совершенство системы водообеспечения оценивается количеством использованной оборотной воды $P_{об}$, %:

$$P_{об} = \frac{Q_{об}}{Q_{об} + Q_{ист} + Q_c} 100 \quad (1.1)$$

где $Q_{об}$, $Q_{ист}$ и Q_c — количество воды, используемой соответственно в обороте, забираемой из источника и поступающей в систему водообеспечения с сырьем.

2. Рациональность использования воды, забираемой из источника, оценивается коэффициентом использования $K_{ис}$:

$$K_{ис} = \frac{Q_{ист} + Q_c - Q_{сбр}}{Q_{ист} + Q_c} < 1. \quad (1.2)$$

3. Потери воды, %, определяются по формуле

$$P_{пот} = \frac{Q_{ист} + Q_c - Q_{сбр}}{Q_{ист} + Q_c + Q_{посл} + Q_{об}} 100, \quad (1.3)$$

где $Q_{посл}$ — количество воды, используемой в производстве последовательно.

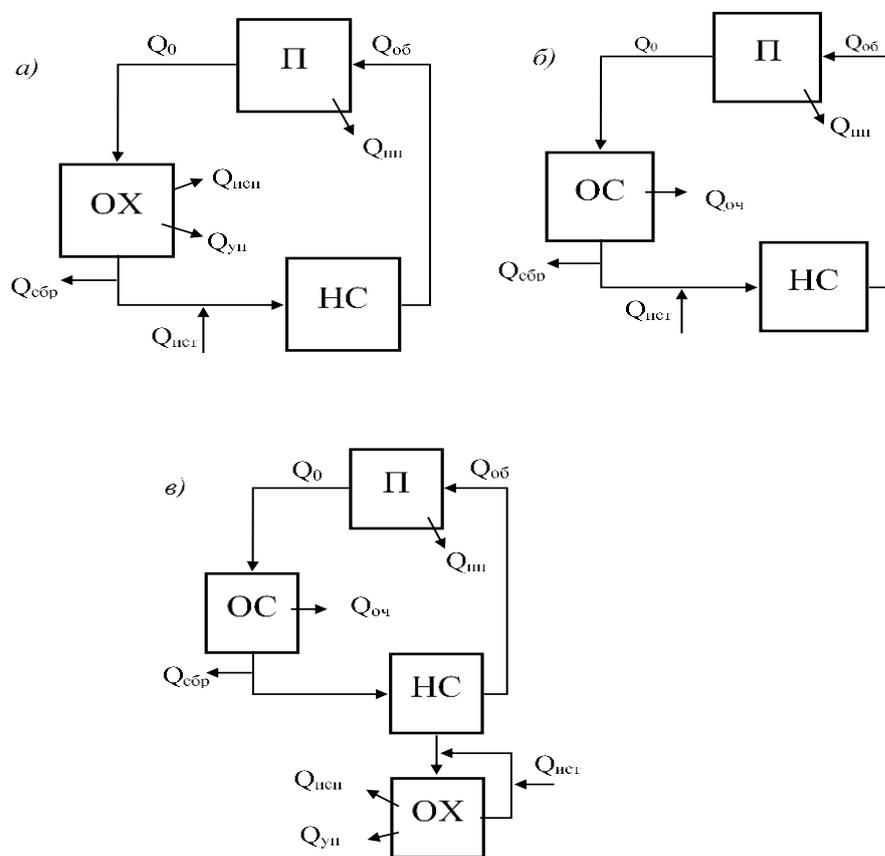


Рис.1.1. Схемы оборотного водоснабжения (а – с охлаждением воды; б – с очисткой воды; в – с очисткой и охлаждением воды), где, П – производство; НС – насосная станция; ОХ – охлаждение воды; ОС – очистка сточной воды; $Q_{об}$ – расход воды в обороте; Q_o – отработавшая вода; $Q_{сбр}$ – сбрасываемая вода (продувка); $Q_{ист}$ – добавочная вода из источника; $Q_{пт}$ – потери воды в производстве; $Q_{исп}$ – потери воды на испарение при охлаждении; $Q_{ун}$ – унос воды при охлаждении; $Q_{оч}$ – потери воды при очистке.

Для систем водообеспечения промышленных предприятий рекомендуется составлять баланс воды, включающий потери на сбросы и необходимое добавление компенсирующих расходов воды в систему. Поступление воды в систему осуществляется не только из источников водообеспечения и после повторного ее использования, но также с исходным сырьем и полуфабрикатами, со вспомогательными веществами (топливо, реагенты и т. п.), с атмосферными осадками (дождь, растаявший снег), в виде шахтного или рудничного водоотлива, а также подземной (дренажной) инфильтрационной воды и др. [31].

Для расчета систем водообеспечения и водоотведения необходимо составлять графики притока сточных вод, а также графические схемы водного баланса по каждому потребителю воды на территории промышленного предприятия. В этих балансовых схемах указывается количество воды, подаваемой каждому потребителю (аппарату, цеху, корпусу), сбрасываемой, каждым потребителем, теряемой безвозвратно в производстве, на охладительных установках, очистных сооружениях и т. д. В схемах, кроме того, указывается: направление движения воды; виды водоподводящих и водоотводящих коммуникаций или категории транспортируемой по коммуникациям воды; расположение потребителей воды, сооружений по ее охлаждению, очистке и т. д. Такие схемы составляются либо в абсолютных количествах циркулирующих вод за единицу времени ($\text{м}^3/\text{сут}$, $\text{м}^3/\text{ч}$), либо в удельных расходах воды на единицу продукции или потребляемого сырья ($\text{м}^3/\text{т}$).

1.2. Определение необходимой степени очистки производственных сточных вод

Для правильного определения необходимой степени очистки сточных вод, спускаемых в водоем, в каждом случае нужно иметь подробные данные об их количестве и составе, а также данные детальных обследований водоема, характеризующие местные гидрологические и санитарные условия. Необходимая степень очистки сточных вод определяется применительно к обще санитарным и органолептическим показателям вредности и к каждому из нормативных показателей загрязнения.

Расчеты по определению необходимой степени очистки сточных вод, спускаемых в водоем, производят по количеству взвешенных веществ, по допустимой БПК в смеси речной воды и сточных вод, по

потреблению сточными водами растворенного кислорода, по температуре воды, окраске, запаху и солевому составу, по ПДК токсичных примесей и других вредных веществ, а также по изменению активной реакции воды водоема [16].

Взаимосвязь между санитарными требованиями к условиям спуска сточных вод в водоемы (соответствие состава и свойств воды водоема, используемого для водопользования, установленным нормативам) и необходимой степени очистки сточных вод перед спуском их в водоем в общем виде выражается формулой

$$C_{ст}q + C_p a Q \leq (a Q + q) C_{нд}, \quad (1.4)$$

где $C_{ст}$ — концентрация загрязнения (вредного вещества) сточных вод, при которой не будут превышены допустимые пределы (расчетный показатель состава и свойств воды в соответствии с санитарными требованиями); C_p — концентрация этого же вида загрязнения (вредного вещества) в воде водоема выше места выпуска рассматриваемого стока; $C_{нд}$ — предельно допустимое содержание загрязнения (вредного вещества) в воде водоема; a — коэффициент смещения, показывающий, какая часть расхода воды в водоеме смешивается со сточными водами в расчетном створе; Q — расход воды в водоеме; q — расход сточных вод, поступающих в водоем.

Значение Q определяется по данным гидрометеорологической службы; q — по технологическим расчетам, а C_p — по литературным данным или на основе натурных замеров.

Коэффициент смещения - a зависит от многих факторов: конструкции выпуска, расстояния до расчетного створа, гидравлических и гидрологических параметров водоема. Значение коэффициента - a определяется по методу В. А. Фролова и И. Д. Родзиллера [36].

Преобразуя формулу (1.4), получим значение ССТ, т.е. концентрацию загрязнения (вредного вещества) и сточных водах, которая должна быть достигнута в результате их очистки и обезвреживания:

$$C_{ст} \leq \frac{aQ}{q} (C_{нд} - C_p) + C_{нд} \quad (1.5)$$

Расчетные отпоры ближайших пунктов водопользования устанавливаются органами Государственного надзора РУз с учетом перспектив использования водоема.

Определение необходимой степени очистки по количеству взвешенных веществ. Допустимое содержание взвешенных веществ в спускаемых сточных водах в соответствии с санитарными

правилами может быть определена из уравнения

$$a Q b + q m = (a Q + q)(p + b), \quad (1.6)$$

откуда

$$m = p(a Q / q + 1) + b \quad (1.7)$$

где p – допустимое по санитарным правилам увеличение содержания взвешенных веществ в водоеме после спуска сточных вод (в зависимости от вида водопользования), г/м³; b – содержание взвешенных веществ в воде водоема до спуска сточных вод, г/м³.

Необходимая степень очистки по взвешенным веществам, %

$$D = \frac{c - m}{c} 100, \quad (1.8)$$

где C – количество взвешенных веществ в сточной воде до очистки, г/м³.

Определение необходимой степени очистки по БПК_{полн}. В основу расчета положено изменение степени загрязненности путем разбавления сточных вод водоема, а также за счет биохимических процессов самоочищения сточных вод от органических веществ.

Баланс БПК смеси речной и сточной воды в расчетном створе (без учета реэрации) выражается уравнением [50]

$$q \cdot L_{СТ} \cdot 10^{-k_{СТ}t} + a \cdot Q \cdot L_p \cdot 10^{-k_p t} = (q + a \cdot Q)L_{п.д}, \quad (1.9)$$

где $L_{СТ}$ – БПК_{полн} сточной воды, которая должна быть достигнута в процессе очистки; L_p – БПК_{полн} речной воды до места спуска сточных вод; $L_{п.д}$ – предельно допустимая БПК_{полн} смеси речной и сточной воды в расчетном створе; $k_{СТ}$ и k_p – константы скорости потребления кислорода соответственно сточной и речной водой; t – продолжительность перемещения воды от места спуска сточных вод до расчетного пункта, сут. равная отношению расстояния по фарватеру от места спуска сточных вод до расчетного пункта $l_{ср}$ к средней скорости течения воды в реке на данном участке $v_{ср}$.

$$L_{СТ} = \frac{aQ}{q \cdot 10^{-k_{СТ}t}} \left(L_{п.д} - L_p \cdot 10^{-k_p t} \right) + \frac{L_{п.д}}{10^{-k_{СТ}t}}. \quad (1.10)$$

Если фактическая БПК_{полн}, подлежащей сбросу сточной воды $L_a > \Gamma_{ст}$, то вода до выпуска в водоем должна быть очищена. Необходимая степень очистки - Э, %, определяется выражением

$$\Xi = \frac{La - L_{CT}}{La} 100 \quad (1.11)$$

Для упрощения расчетов можно воспользоваться табл. 1.1. Константа k_p имеет различные значения в зависимости от температуры воды (табл. 1.2).

Константу скорости потребления кислорода k_{CT} следует либо определять на основе литературных данных аналогичных показателей для родственных предприятий либо проводить специальные исследования. По полученным данным строится кривая потребления кислорода, на основании которой и рассчитывается k_{CT} .

Таблица 1.1.

k_{CT} и k_p	Значения величин $10^{-k_{CT}t}$ и $10^{-k_p t}$ при t , сут									
	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6
0,04	0,981	0,955	0,912	0,871	0,832	0,794	0,759	0,692	0,631	0,575
0,06	0,966	0,933	0,871	0,813	0,759	0,708	0,661	0,575	0,501	0,437
0,08	0,955	0,912	0,832	0,759	0,692	0,631	0,575	0,479	0,398	0,331
0,1	0,944	0,891	0,794	0,708	0,631	0,572	0,501	0,398	0,316	0,251
0,12	0,933	0,871	0,759	0,66	0,575	0,501	0,436	0,331	0,251	0,191
0,14	0,922	0,851	0,724	0,617	0,523	0,447	0,38	0,275	0,2	0,145
0,16	0,912	0,832	0,692	0,575	0,479	0,398	0,331	0,229	0,159	0,11
0,18	0,903	0,813	0,661	0,537	0,437	0,355	0,258	0,191	0,126	0,083
0,2	0,891	0,794	0,631	0,501	0,393	0,316	0,251	0,158	0,1	0,063
0,22	0,881	0,776	0,603	0,478	0,363	0,283	0,219	0,132	0,079	0,049
0,24	0,871	0,759	0,575	0,437	0,331	0,251	0,191	0,11	0,063	0,036
0,26	0,861	0,741	0,55	0,407	0,302	0,224	0,166	0,091	0,05	0,025
0,28	0,851	0,724	0,525	0,38	0,275	0,199	0,145	0,076	0,04	0,021
0,3	0,841	0,708	0,501	0,355	0,251	0,178	0,126	0,063	0,032	0,016
0,4	0,794	0,631	0,398	0,251	0,158	0,1	0,063	0,025	0,01	0,004
0,5	0,75	0,565	0,316	0,178	0,1	0,056	0,032	0,01	0,003	0,001

Таблица 1.2.

$T, ^\circ C$	0	5	10	15	20	25	30
k_p	0,04	0,05	0,063	0,08	0,1	0,126	0,158

Определение необходимой степени очистки по растворенному в воде водоема кислороду. В соответствии со схемой изменения кислородного баланса водоема после сточных вод наблюдается уменьшение концентрации растворенного кислорода до определенного минимума (так называемая «критическая точка»), после которого

содержание растворенного кислорода начинает возрастать. Если условно принять, что в «критической точке» содержание растворенного кислорода $O_{n.д}$ будет не менее 4 или 6 мг/л (соответственно, для водоемов питьевого и культурно – бытового или рыбохозяйственного вида водопользования), то во всех остальных пунктах по течению реки оно, очевидно, будет выше. Этим самым удовлетворяется требование санитарных правил [47].

Наиболее простой из существующих способов расчета основан на учете поглощения сточными водами только того растворенного кислорода, который содержится в речной воде выше места спуска сточных вод. При этом полагают что если концентрация растворенного в воде кислорода не станет ниже $O_{n.д}$, в течение первых 2 сут. она не снизится и в дальнейшем. Это условие выражается уравнением

$$a Q O_p - (a Q L_p + q L_{cm}) k = (a Q + q) O_{n.д} \quad (1.12)$$

где O_p - концентрация растворенного кислорода в речной воде выше место спуска сточных вод, г/м³; k – коэффициент пересчета БПК_{полн}, определяемой лабораторным путем в БПК₂; $O_{n.д}$ – минимальная концентрация растворенного кислорода, которая должна сохраниться в воде водоема ниже места спуска сточных вод, г/м³.

Значение k , определяемое расчетным путем, изменяется в зависимости от содержания в производственных сточных водах легко и трудно окисляемых органических соединений.

Приведенное выше уравнение составлено из условия, что весь наличный запас растворенного в водоеме кислорода QO_p должен быть в такой мере израсходован на окисление органического загрязнения речной и сточной воды $(QL_p + qL_{CT}) k$, чтобы в общей их смеси $(Q+q)$ концентрация растворенного кислорода была равна или больше $O_{n.д}$, как это требуется санитарными правилами. Допустимая концентрация сточных вод при этом условии

$$L_{CT} = \frac{aQ}{kq} (O_p - kL_p - O_{n.д}) - \frac{O_{n.д}}{k}. \quad (1.13)$$

Если полученная величина L_{CT} меньше расчетной концентрации в проектируемых к спуску в водоем сточных водах, то последние должны быть очищены до концентрации L_{CT} .

Второй способ расчета позволяет учитывать процессы поглощения кислорода сточными водами из речной воды и поверхностную реаэрацию.

При расчете кислородного баланса реки по этому способу, кроме

указанных выше величин, учитывают: среднюю скорость движения воды в водоеме v_{cp} , м/с; температуру воды в реке в расчетный период T , °С; константы (постоянные величины в соответствующих уравнениях) скорости биохимического поглощения кислорода k_1 и скорости поверхностной реэрации k_2 [56].

Определение необходимой степени очистки по температуре воды водоема. Расчет производится в соответствии с санитарными требованиями, ограничивающими повышение летней температуры воды за счет термальных загрязнений сточных вод, поступающих в водоем. Это условие описывается уравнением

$$T_{cm} = (a Q/q + 1) T_{\delta} + T_p \quad (1.14)$$

где T_{cm} – максимальная температура сточных вод, при которой соблюдается санитарное требование относительно температуры воды в расчетном створе; T_p – максимальная температура воды водоема до места выпуска сточных в летнее время; T_{δ} допустимое повышение (не более чем на 3°С) температуры воды водоема [95].

Определение необходимой степени очистки по обще-санитарному показателю вредности, а также по санитарно-токсикологическому и органолептическому показателям вредности, по которым установлены ПДК. Расчет производится по формуле (1.5).

Обычно в процессе очистки производственных сточных вод различные вещества одной группы лимитирующего показателя вредности очищаются неодинаково. Поэтому необходимую степень следует находить для наиболее трудно извлекаемого из сточных вод компонента. Концентрация же этого вещества в расчетном створе должна быть:

$$C_B \leq C_{в.п.д} \left(1 - \sum_1^{i-1} \frac{C_i}{C_{iп.д}} \right). \quad (1.15)$$

Если условие необходимой степени очистки будет выдержано для этого вещества, то эффект от других загрязняющих компонентов также будет обеспечен, а санитарные нормы на присутствие нескольких веществ одной группы лимитирующего показателя вредности выдержаны.

Определение необходимой степени очистки по изменению активной реакции воды. При спуске кислых и щелочных сточных вод необходимо учитывать нейтрализующую способность водоема, что в ряде случаев позволяет обойтись без специальных сооружений по нейтрализации сточных вод.

Вода водоемов содержит бикарбонаты кальция $Ca(HCO_3)_2$ и магния $Mg(HCO_3)_2$, обуславливающие ее карбонатную жесткость, а также угольную кислоту в виде растворенного диоксида углерода CO_2 . Кислоты, поступающие в водоем вместе с производственными сточными водами, взаимодействуют с бикарбонатами, вытесняя из них углекислоту, в связи с чем количество бикарбонатов в воде (т. е. её щелочность) уменьшается, а количество растворенного диоксида углерода увеличивается.

Реакция нейтрализации (например, серной кислоты) в водоеме за счет бикарбонатов кальция протекает по формуле



Поступление в водоем вместе со сточными водами щелочей приводит к взаимодействию их с диоксидом углерода; что увеличивает щелочность воды водоема. Реакция в этом случае может протекать по формуле



Согласно санитарным правилам и водоемах всех видов водопользования в расчетных створах изменение рН не должно выходить за пределы 6,8-8,5.

Для установления допустимого количества кислоты или щелочи, которое может быть вместе со сточными водами сброшено в водоем, необходимо знать щелочность Щ и рН воды водоема. Для облегчения расчета можно воспользоваться номограммой (рис. 1.2), позволяющей с достаточной для практических расчетов точностью установить максимальное количество кислоты C_k или щелочи $C_{щ}$ (в мл нормального раствора), которое может быть нейтрализовано в 1 л воды водоема при условии, что в расчетном створе рН воды останется в пределах санитарных требований [100].

На номограмме сплошные кривые линии относятся к C_k , а пунктирные к $C_{щ}$. Каждая из этих линий соответствует определенному значению щелочности воды водоема. Определение C_k и $C_{щ}$ производят восстановлением перпендикуляра из точки, соответствующей рН воды водоема, до пересечения с соответствующей кривой щелочности воды водоема и последующим проведением из этой точки пересечения горизонтальной прямой до оси ординат.

Из условий смешения сточных вод с водой водоема получается зависимость для определения допустимого содержания кислоты $C_{ст.щ}$ в

сточных водах, спускаемых в водоем:

$$C_{ст.к} = a Q C_k / q \quad (1.18)$$

$$C_{ст.щ} = a Q C_{щ} / q. \quad (1.19)$$

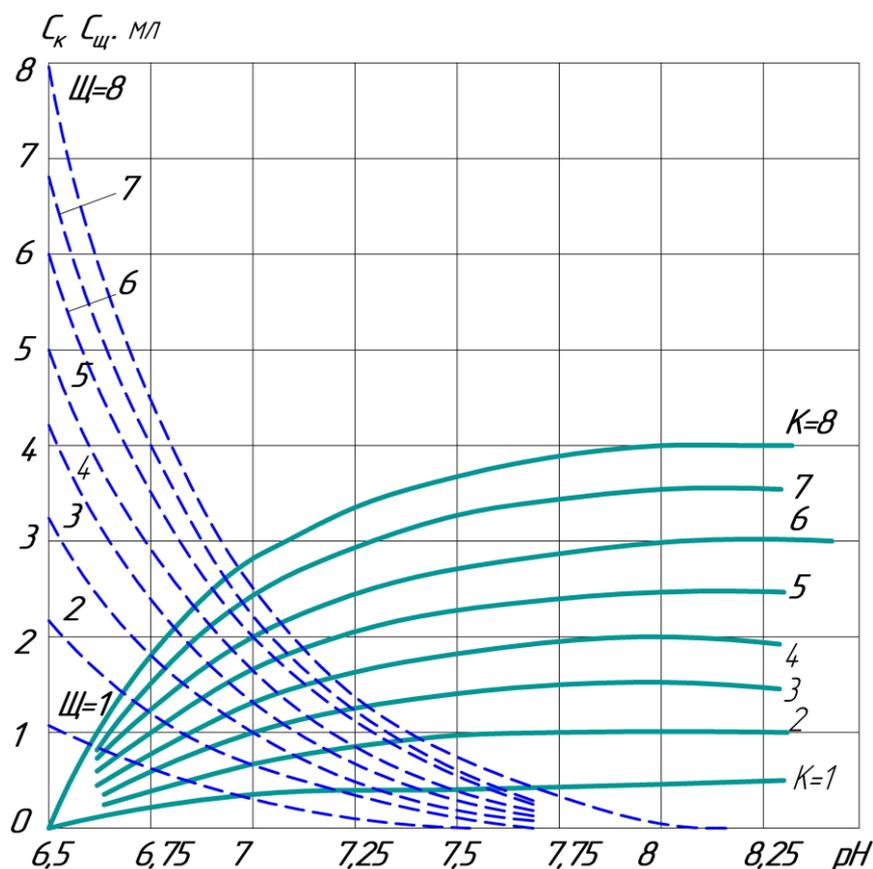


Рис.1.2. Номограмма для расчета допустимого количества кислых щелочных сточных вод, спускаемых в водоем.

Если расчетные концентрации щелочи или кислоты будут меньше фактических концентраций в производственных сточных водах, то перед сбросом в водоем сточные воды необходимо нейтрализовать.

Приведенные выше формулы расчета необходимой степени очистки производственных или смеси производственных и бытовых сточных вод относятся к проточным водоемам, т. е. к основным приемникам сточных вод.

Следует отметить, что в проточных водоемах кратность разбавления в расчетном створе определяется по формуле

$$n_p = (a Q + q) / q \quad (1.20)$$

При расчете необходимой степени очистки сточных вод, спускаемых в непроточные водоемы, в расчетные формулы (1.5), (1.7), (1.10), (1.13), (1.16), (1.18) и (1.19) вместо выражения aQ/q [см. формулу (1.20)] вводится выражение $n-1$ и они приобретают следующий вид:

- 1) предельно допустимая концентрация загрязнения (вредного вещества) в спускаемых сточных водах

$$C_{cm} \leq C_{\epsilon} + n(C_{n.d} - C_{\epsilon}) \quad (1.21)$$

где C_{ϵ} – концентрация загрязнения (вредного вещества) в воде непроточного водоема;

- 2) концентрация взвешенных веществ в спускаемых сточных водах

$$m = b + np \quad (1.22)$$

- 3) допустимая величина БПК_{полн} в спускаемых сточных водах

$$L_{CT} = \frac{n-1}{10^{-k_{CT}t}} (L_{п.д} - L_B \cdot 10^{-k_B t}) + \frac{L_{п.д}}{10^{-k_{CT}t}} \quad (1.23)$$

где L_B – БПК_{полн} воды в непроточном водоеме до сброса сточных вод; k_B – константа скорости потребления кислорода в воде непроточного водоема [103];

- 4) допустимая БПК_{полн} в спускаемых сточных водах по растворенному в воде кислороду

$$L_{CT} = \frac{n-1}{k} (O_B - kL_B - O_{п.д}) - \frac{O_{п.д}}{k}, \quad (1.24)$$

где O_{ϵ} – концентрация растворенного кислорода в воде непроточного водоема до спуска сточных вод; $O_{n.d}$ – ПДК растворенного кислорода, которая должна быть в расчетном створе после спуска сточных вод;

- 5) допустимая максимальная температура в спускаемых сточных водах

$$T_{cm} = nT_{\delta} + T_{\epsilon} \quad (1.25)$$

где T_{ϵ} – расчетная температура в воде непроточного водоема до спуска сточных вод;

- б) допустимое содержание кислоты или щелочи в спускаемых

СТОЧНЫХ ВОДАХ

$$C_{ст.к}=(n-1) C_k; \quad (1.26)$$

$$C_{ст.ц}=(n-1) C_{ц}. \quad (1.27)$$

1.3. Схемы очистки и использования сточных вод территориально-производственных комплексов

В развитии народного хозяйства Республики Узбекистан особое внимание обращено на создание территориально-производственных комплексов (ТПК) как основной хозяйственной единицы, так как большое значение имеет решение вопросов рационального использования различных природных ресурсов.

Экономическое развитие ТПК проходит в трех основных направлениях:

- 1) создание эффективной структуры производства основных видов продукции;
- 2) охрана окружающей природной среды;
- 3) рациональное использование ресурсов, в том числе воды.

При размещении производительных сил необходимо: максимально сохранять природные условия; внедрять безотходные процессы, потребляющие минимальное количество воды; экономно использовать имеющиеся земельные территории, перераспределять природные ресурсы и промышленное сырье с целью создания благоприятной природной среды; ограничивать развитие отдельных производств в некоторых районах (курортных или туристических зонах, заповедниках и т. п.). При этом к мероприятиям по охране окружающей природной среды относятся также разработка и строительство на предприятиях канализационных очистных сооружений, переработка промышленных и коммунальных отходов, озеленение и некоторые другие санитарно-гигиенические мероприятия.

Вредное влияние производственных сточных вод можно предотвратить не только с помощью канализационных очистных сооружений, но и путем создания замкнутых циклов водопользования. Следовательно, при проектировании производств для ТПК с целью охраны чистоты водоемов следует в первую очередь предусматривать строительство безотходных предприятий и очистных сооружений, способствующих резкому улучшению экологической обстановки [64].

Принципиальная схема замкнутой системы водного хозяйства ТПК приведена на рис. 1.3. Согласно этой схеме основное количество воды находится в обороте, а для подпитки оборотных систем используются очищенные и доочищенные производственные и городские сточные воды. Подпитка оборотных систем свежей водой допускается в том случае, если очищенных сточных вод недостаточно для восполнения потерь воды в оборотных системах. Свежая вода расходуется для питьевых и бытовых целей. Допускается также ее расход в операциях, в которых очищенные воды не могут быть использованы по условиям технологии или гигиены.

Очистку на внеплощадочных очистных сооружениях производственных и городских сточных вод целесообразно производить отдельно. Доочистка городских сточных вод осуществляется фильтрованием через зернистые загрузки. Создание замкнутых систем отвечает экономическим и экологическим требованиям

На территории нашей страны размещено большое число производственных комплексов (например, ведущая отрасль ТПК — АГМК, НГМК, БГМК). Предприятия этой отрасли сбрасывают загрязнения в виде использованных органических растворителей, токсичных соединений металлов с отработавшими гальваническими и травильными растворами, СОЖ и эмульсий. Для указанных жидкостей необходимо создавать сложные системы очистки с регенерацией наиболее ценных компонентов. Поскольку довольно часто органические продукты привозятся в комплекс издалека, вероятно, достаточно выгодно централизованно перерабатывать и регенерировать такие вещества, как четыреххлористый углерод, трихлорэтилен и др. Сброс гальванических и травильных растворов (АГМК, НГМК) может привести к накоплению тяжелых металлов в биоорганизмах прибрежной зоны и к поступлению их по трофическим цепям в организм человека. Избежать этого можно путем создания локальных очистных установок на предприятиях этой отрасли [122].

Следовательно, системы улавливания вредных компонентов и их регенерация совершенно необходимы. Наиболее целесообразно в этом случае применять ионообменный метод обработки сточных вод.

Достаточно значительной по объему выпускаемой продукции является в ТПК пищевая промышленность. Эта отрасль развивается в виде комплекса предприятий, для которых необходимо разрабатывать системы водооборота с утилизацией образующихся отходов. Неочищенные сточные воды мясомолочной, спиртоводочной, сахарной отраслей загрязняют водоемы и особенно мелкие реки. Применение метода биологической очистки обеспечит полную очистку сточных вод

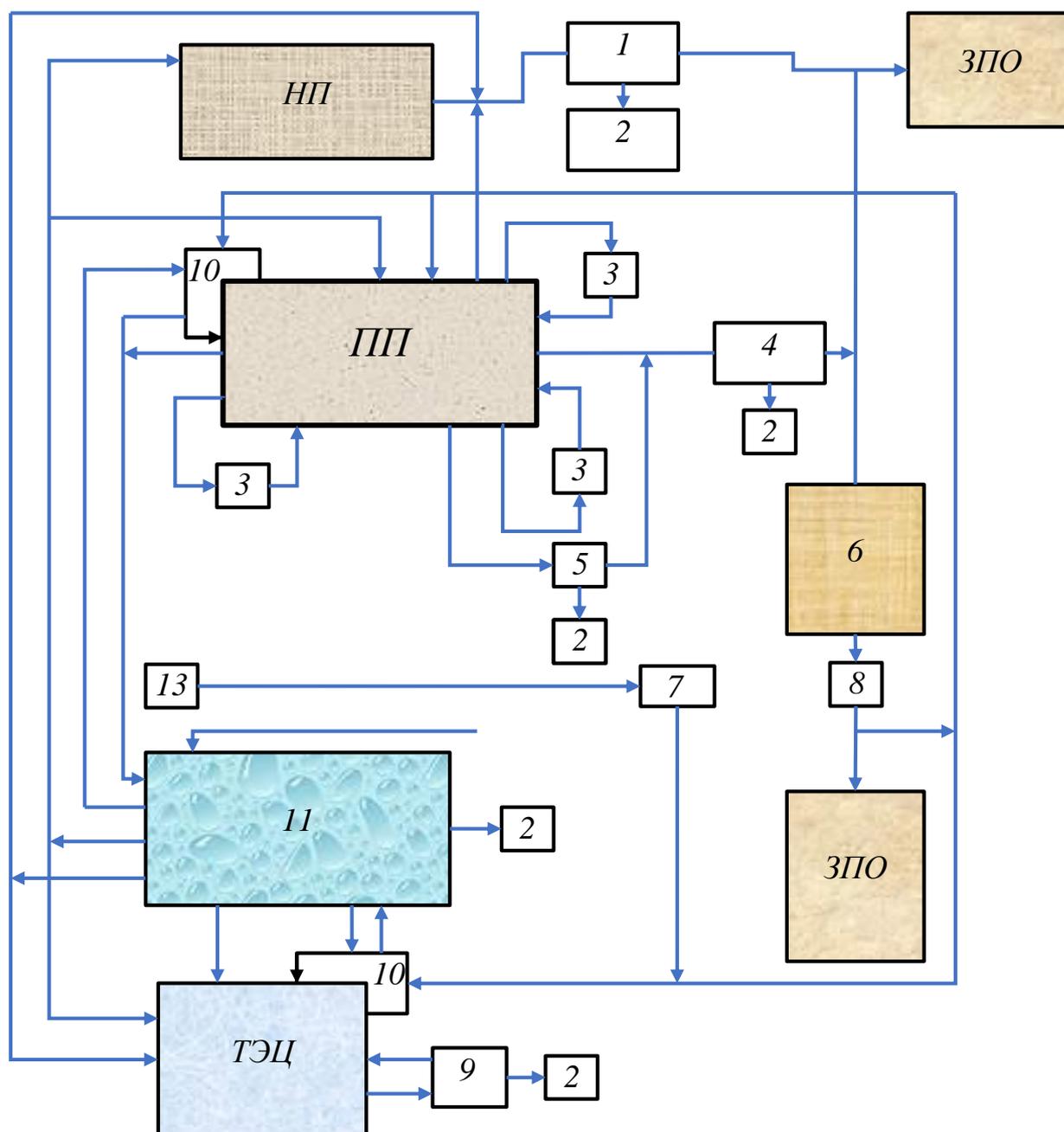


Рис. 1.3. Принципиальная схема замкнутой системы водного хозяйства объектов ТПК.

где 1 — сооружения очистки городских сточных вод; 2 — сооружения по обработке осадка с получением вторичного сырья; 3 — локальная замкнутая система технического водоснабжения; 4 — сооружения очистки производственных сточных вод; 5—предварительная очистка локального потока сточных вод; 6 — пруд; 7 — сооружения по очистке дождевых вод; 8 — сооружения для доочистки воды; 9 — шламоотстойник; 10 — система оборотного охлаждающего водоснабжения; 11 — станция водоподготовки и химической очистки; 12 — трубопровод для подачи свежей воды; 13 — резервуар дождевых вод; НП— населенный пункт; ПП — промышленное предприятие; ЗПО — земельные поля орошения; ТЭЦ – теплоэлектростанция.

этих предприятий [64].

Агропромышленный комплекс (АПК) является одной из сложнейших территориально-производственных единиц, так как использование возобновляемых природных ресурсов в сельском хозяйстве в сочетании с обслуживающими и обрабатывающими сельское хозяйство промышленными предприятиями ставит ряд задач по предотвращению вредного воздействия отходов комплекса на окружающую природную среду.

В зоне АПК на полях, животноводческих фермах и птицефабриках образуется большое количество сточных вод, содержащих соединения биогенных элементов (азота и фосфора) и ядохимикатов. Сельское хозяйство и его промышленные предприятия по переработке продукции дают значительное количество органических отходов, подвергающихся быстрому разложению с выделением токсичных соединений. Сточные воды этих комплексов требуют специальной обработки с утилизацией отходов производства. АПК должны иметь современные системы биологической очистки сточных вод с возвратом воды на технологические нужды и, кроме того, заводы по переработке активного ила в кормовые добавки или в органоминеральные удобрения. В этом случае можно сократить поступление удобрений из областей и снизить отрицательное влияние накапливаемых отходов на окружающую природную среду. Таким образом, АПК должен иметь установки для подготовки отходов производства к использованию [66].

При проектировании внеплощадочных систем канализации промышленных районов и ТПК следует уделять особое внимание вопросам межотраслевого кооперирования при строительстве очистных сооружений независимо от ведомственной принадлежности канализуемых объектов, что значительно снижает капитальные расходы при их реализации.

Снижение затрат на строительство внеплощадочных систем канализации за период до 2021 г. за счет внедрения новых типов сооружений, эффективных технологических процессов очистки и новых материалов составит: по отведению сточных вод до 3 %; по механической очистке до 10%; по биологической очистке до 20 %; по глубокой очистке сточных вод до 10 %; по обработке осадка до 5 % [67].

При создании безотходных технологических процессов, замкнутых систем водопользования, гибких автоматизированных процессов очистки сточных вод постановка задач унификации и оптимизации должна рассматривать как единое целое основную технологию и системы обработки для повторного использования производственных сточных вод.

Автоматизация является основным средством создания оптимального режима работы как отдельных очистных сооружений, так и всего комплекса объектов водного хозяйства. Только при полностью автоматизированных сооружениях обеспечивается оптимальный режим работы оборудования в зависимости от качества исходной сточной воды и требований, предъявляемых потребителями к ее качеству после очистки [68].

1.4. Определение уровней автоматизации процесса очистки сточных вод

Решение проблемы необходимости максимальной автоматизации технологических процессов очистки сточных вод связано с широким кругом теоретических и экспериментальных работ, связанных синтезом дискретного закона управления технологическими объектами, а также его практической реализацией на современной элементной базе. Высокая вероятность заражения, обслуживающего персонала патогенной микрофлорой при контакте со сточными водами и воздухом на очистных сооружениях предопределяет необходимость максимальной автоматизации работы канализационных сооружений [71].

Решение проблемы неотъемлемо связано с широким кругом теоретических и экспериментальных работ, связанных с синтезом дискретного закона управления технологическими объектами, а также его практической реализации на современной элементной базе.

Для диапазона производительности установок очистки сточных вод от 5 до 100 м³/сут целесообразно применение малых локальных систем управления, к основным достоинствам которых можно отнести малую стоимость и скорость.

Локальные системы управления имеют отличную устойчивость по отношению к внешним возмущающим факторам, а использование оптимальных законов регулирования, полученных методом частотного синтеза, позволят полностью избавиться от статической ошибки регулирования, что резко улучшает динамические свойства системы и уменьшает потребление электрической энергии. Вариант локальной системы управления представлен на рис. 1.4, следующей структурной схемой.

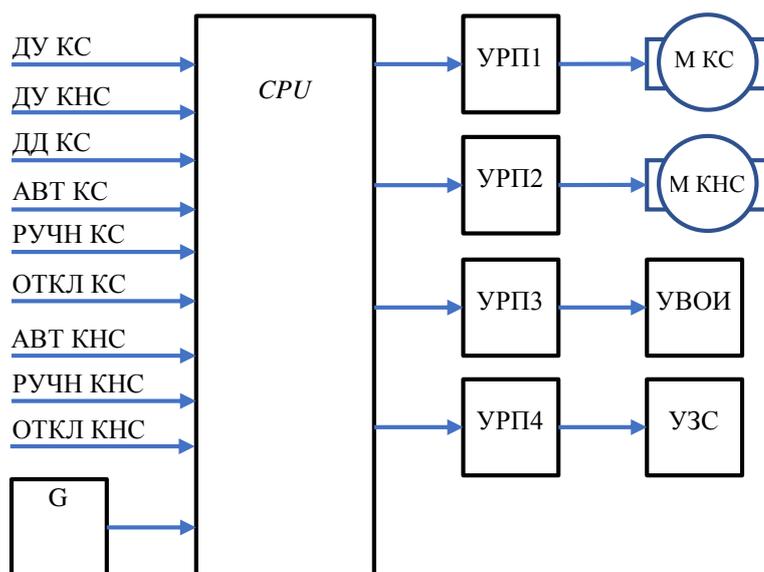


Рис. 1.4. Локальная система управления циркуляционными насосами камеры смешения и канализационно-насосной станции очистных сооружений, где ДУ КС - датчик уровня камеры смешения КС; ДУ КНС - датчик уровня канализационно-насосной станции, подающей сточные воды в КС; ДД - датчик давления камеры смешения; АВТ, РУЧН, ОТКЛ - контакты подключения клавиатуры режимов работы исполнительными устройствами КС и КНС; G - тактовый генератор; УРП 1-4 - устройство расширения порта; М КС, КНС - насосы; УВОИ - устройство визуального отображения информации; УЗС - устройство звуковой сигнализации. CPU - контроллер.

Представленная на рис. 1.4 структурная схема локальной системы управления является микропроцессорной системой. Реализованный алгоритм работы системы позволяет управлять исполнительными объектами в реальном масштабе времени. Блок локальной системы управления оснащён удобной клавиатурой, светодиодным устройством визуального отображения информации - УВОИ, которое не только производит мониторинг выполнения технологического процесса, но и выводит сообщения об ошибках, возникших в процессе выполнения технологических задач. Он позволяет проводить переключение исполнительного оборудования в зависимости от установленного регламента функционирования и при отклонении от него подаётся соответствующий звуковой сигнал, предупреждающий оператора о возникновении аварийной ситуации в технологическом процессе.

Принцип работы очистных сооружений с КС позволяет создать унифицированные системы диагностики и управления технологическим процессом. Опыт работы создаваемых АСУ в Узбекистане, России и др. странах, позволяет сделать вывод о необходимости поэтапного введения

следующих двух подсистем управления технологическим процессом очистки сточных вод, соответствующих первому и второму уровню автоматизации и управления [135].

Первый уровень. Подсистема диагностики и локального управления создается для определения количественных характеристик нерегулируемых параметров; контроля и поддержания регулируемых параметров технологического процесса в заданных пределах (локальные следящие системы управления).

Второй уровень. Следящие системы управления, создаются для управления параметрами технологического процесса по заданным эталонным переходным характеристикам наблюдаемых выходных параметров.

Первый уровень управления базируется на использовании АСУ ТП отдельных участков технологического процесса, поддерживающих на заданном уровне единичные параметры технологического процесса: циркуляционного расхода иловой смеси, расхода осадка из песколовков, режима удаления избыточного ила, режима регенерации биореакторов, концентрации кислорода в иловой жидкости, рН, температур жидкости и др. параметров.

Рассмотренный уровень АСУ, предназначен для управления работой несколькими объектами технологического процесса (насосами, задвижками). На первом уровне используется релейный закон управления объектами и сбора первичной информации.

В состав второго уровня АСУ входит следящие системы управления, предназначенные для стабилизации и контроля управлением всех технологических процессов, т.е. работой всех АСУ отдельных участков технологического процесса. Для этой цели в управление вводится диспетчер и АРМ (автоматизированное рабочее место), снабженное связью с операторскими станциями и соответствующими компьютерными программами. Указанные подсистемы будут представлять собой человеко-машинную систему, в которой диспетчер сначала с помощью ЭВМ производит первичную обработку технологической информации первого уровня (данные по контролируемым параметрам отдельных участков технологического процесса), затем, используя рекомендации ЭВМ по оптимальному ведению технологического процесса очистки сточных вод осуществляет управление, применяя различные аппаратные средства первого уровня.

Основными задачами при реализации работы первого и второго уровня автоматизации является: определение концентрации растворенного кислорода в аэрационной зоне аэротенка-отстойника КС (и сравнение значения с расчетным) позволит регулировать кратность

циркуляции иловой жидкости путем управления частотой вращения электродвигателя или степенью открытия задвижки, ход которой также, в свою очередь автоматизирован. По определению влажности иловой смеси в отстойной зоне и сравнению значения с расчетным уровнем влажности, регулируют степень открытия задвижки на трубопроводе вывода избыточного ила из системы [109].

В общем, виде функциональная структура АСУ ТП очистки сточных вод представлена на рис. 1.5.

На наш взгляд с точки зрения автоматизации технологии очистки сточных вод представляет собой первая подсистема процесса биологической очистки на КС. Вариант её реализации представлен на рис. 1.6.



Рис. 1.5. Структурная схема автоматической системы управления технологическим процессом очистки сточных вод.

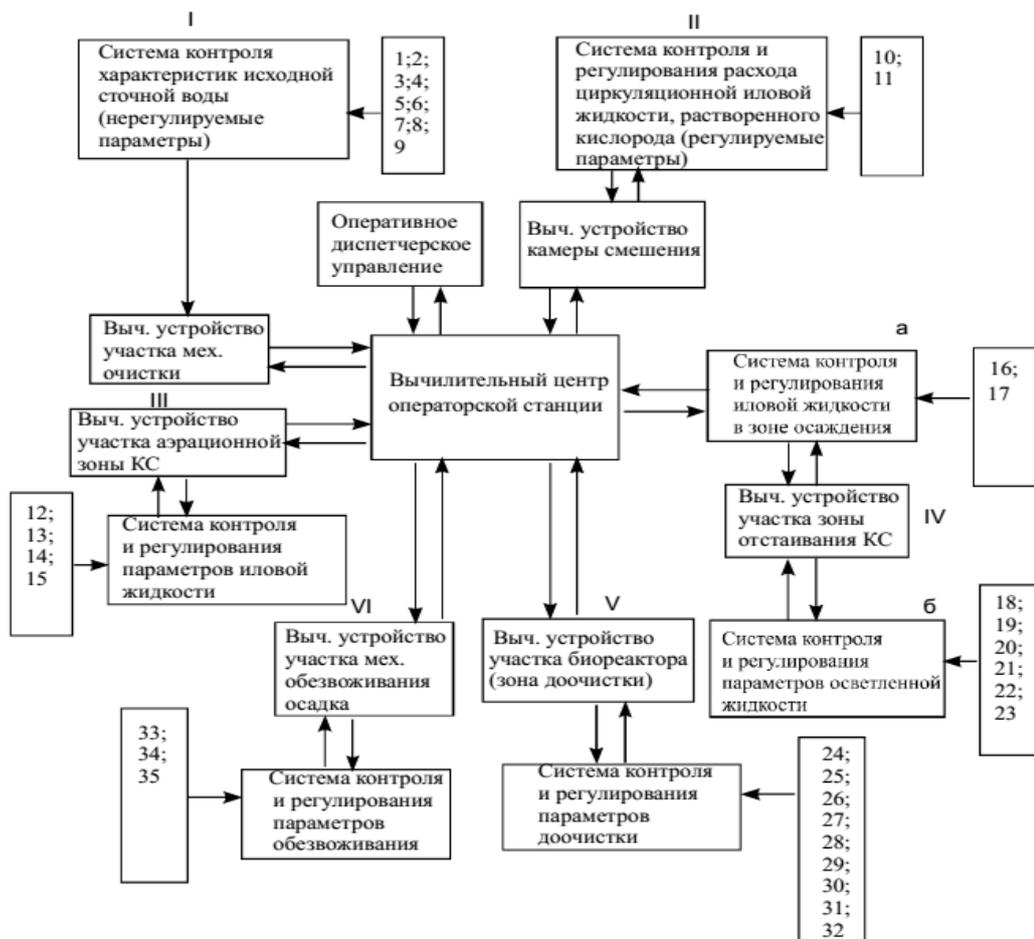


Рис. 1.6. Структурная схема АСУ первой подсистемы процесса биологической очистки на КС, где 1, 8, 10 — измерители расхода соответственно: исходной сточной воды; песковой пульпы; циркулирующей иловой жидкости; 2 — измеритель температуры; 3, 12, 24 — измеритель рН: исходной сточной воды; иловой жидкости в аэрационной зоне КС; после биореактора доочистки; 4, 20, 27 — датчики скорости потребления кислорода соответственно: в исходной сточной воде; в осветленной сточной воде; в сточной воде после доочистки; 5, 2, 28 — датчики концентрации азота аммонийного соответственно: в исходной сточной воде; в осветленной сточной воде; в сточной воде после доочистки; 6, 23, 30 — датчики концентрации фосфора (фосфатов) соответственно в исходной сточной воде, в осветленной сточной воде и в сточной воде после доочистки; 7, 31 — датчики концентрации металлов соответственно в исходной сточной воде и после доочистки; 9, 34, 35 — датчики определения влажности соответственно: осадка после песколовки; осадка, подаваемого на обезвоживания; кека; 11, 13, 19, 26 — датчики концентрации растворенного кислорода: в циркулирующей иловой жидкости; в иловой жидкости аэрационной зоны КС; в осветленной сточной воде; в сточной воде после доочистки; 14, 17 — датчик концентрации активного ила: в аэрационной зоне и зоне осаждения активного ила; 15 — датчик илового индекса в аэрационной зоне; 16 — датчик уровня осевшего ила; 18, 25 — датчики

мутности осветленной сточной воды; сточной воды после доочистки; 22, 29 — датчики концентрации азота нитратов соответственно: в осветленной сточной воде; в сточной воде после доочистки; 32, 33 - дозаторы соответственно коагулянта для удаления фосфатов и флокулянта для интенсификации процесса обезвоживания осадка.

На основе анализа представленных уровней реализации автоматизации процесса очистки сточных вод, позволяет сделать выводы: что экспертная система управления позволит резко улучшить основные показатели выходных характеристик, качества системы автоматического регулирования: время переходного процесса системы и перерегулирования.

Визуализация процесса очистки сточных вод, позволит обслуживающему персоналу выбирать и принимать решения, предлагаемые экспертной системой. Это позволит исключить неквалифицированное вмешательство в технологический процесс очистки сточных вод. К недостаткам её можно отнести только высокую стоимость [118].

1.5. Ранжировка элементов производственных структур очистных сооружений

Специфические особенности технологических схем, трудности контроля и управления очистными сооружениями долгое время не позволяли автоматизировать эти объекты на базе известных методов. Возросшие требования к качеству их эксплуатации выдвинули необходимость значительного расширения круга задач, решаемых с позиций автоматизированного управления на базе достижений теории технического управления, методов математического моделирования и оптимизации технологических процессов. Поэтому весьма важной является разработка теоретической и методологической базы автоматизированных комплексов с учетом особенностей структуры и взаимосвязей оборудования, свойств очищаемых потоков и побочных продуктов очистки и обусловленных этими свойствами особенностей технологического контроля.

Известно, что практически все современные очистные сооружения состоят из большого числа разнотипных машин и аппаратов, связанных между собой сложной технологической схемой. Характер этих связей может быть весьма различным: Сточные воды, сырой и избыточный ил, суспензии сброшенные осадки, обрабатываемые в одних аппаратах, поступают в следующие по ходу процесса сооружения; побочные

продукты очистки, получаемые на одном участке системы, утилизируются на другом; исходные, промежуточные и конечные материальные потоки распределяются между различными потребителями.

Задача автоматизации управления такими природоохранными системами состоит в том, чтобы поддерживать наиболее эффективный режим в каждом аппарате или сооружении в отдельности, но и в том, чтобы установить между элементами технологической схемы связи, обеспечивающие оптимальную работу всей системы в целом [125].

Поскольку вид производственной структуры влияет на структуру принятия и построение АСУ возникает необходимость качественной оценки сходства или различия производственных структур. Это позволяет переносить проектные решения, полученные при разработке АСУ одного предприятия на группу предприятий со сходной структурой. Определение степени близости структур позволяет провести и классификации, которая состоит в развитии всего множества структур на группу структур, сходных между собой.

Допустим, что задано множество производственных структур $I=(I_1, I_2, \dots, I_n)$. Пусть x_j – множество элементов структуры X_j . Расстояние $d(x_i, x_j)$ между элементами X_i и X_j характеризует расстояние между двумя множествами следующим образом [147]:

$$d(X_i, X_j) = 1 - \frac{|x_i \cap x_j|}{|x_i \cup x_j|} \quad (1.28)$$

где $|X|$ - число элементов множества X .

при этом считаем, что две структуры имеют одинаковые элементы, если названия этих элементов (например, названия цехов) в обоих структурах совпадают.

Числитель дроби в выражении (1.43) представляет собой число общих элементов в сравниваемых структурах, а знаменатель – суммарное число разных элементов. Расстояние $d(X_i, X_j)$ равно 0, если множества элементов двух структур совпадают, и равно 1 если две структуры не имеют ни одного общего (одинакового) элемента. Если вид элементов структуры определяет связи между ними, то расстояние между всеми производственными структурами характеризуются симметричной матрицей расстояний

$$D = \begin{vmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{vmatrix} \quad (1.29)$$

причем $d_{ij} = d(x_i, x_j)$, $d_{ii} = 0$.

Производные структуры I_i и I_j похожи, если расстояние d_{ij} не превосходит некоторого порогового значения d_0 .

Разбиение множества структур на группы похожих структур относится к задачам кластерного анализа [146] разбить множество объектов I на m непустых кластеров (подмножеств) так, чтобы каждый объект принадлежал одному и только одному подмножеству разбиения, и чтобы объекты, принадлежащие одному и тому же кластеру, были сходными.

Задача оптимального разбиения производственных структур на группы ставится как задача среднего внутригруппового расстояния

$$W = \frac{\sum_{l=1}^m \sum_{(ij) \in A_l} d_{ij}}{\sum_{i=1}^m c_{n_i}^2} \quad (1.30)$$

$$\text{при условии } d_{ij} \leq d_0, (ij) \in A_l, l = \overline{1, m} \quad (1.31)$$

где n_i – число объектов (структур) в l -ом кластере; A_l – множество пар объектов, входящих в l -й кластер.

Задача оптимальной в смысле критерия (1.30) классификации производственных структур является задачей дискретного программирования [4]. Для её приближенного решения может быть применена комбинация метода Боннера и метода последовательного поиска, относящегося к группе методов локальной оптимизации. В соответствии с методом Боннера случайно выбирается некоторый начальный объект. Далее из всех случайных объектов множеств I начиная I_1 , выделяются объекты, которые можно объединить в один кластер с начальным объектом с учетом условия (1.31). Из оставшихся объектов снова случайным образом выбирается объект, и процесс повторяется, пока все объекты не будут разбиты на кластеры. Полученное разбиение является исходным для процесса последовательного поиска. Метод последовательного поиска является аналогом метода Гаусса-Зейделя отыскания экстремума функции многих переменных при наличии ограничений на область допустимых значений переменных. Вычисления производятся в соответствии со следующими рекуррентными формулами:

$$\left. \begin{aligned} W^{(1)} &= \min_{x_i} W(\bar{x}^{(0)}); \\ &\dots \dots \dots \\ W^{(j)} &= \min_{x_j} W(\bar{x}^{(j-1)}); \\ &\dots \dots \dots \\ W^{(n)} &= \min_{x_n} W(\bar{x}^{(n-1)}); \\ &\dots \dots \dots \\ W^{(n+g)} &= \min_{x_g} W(\bar{x}^{(n+g-1)}); \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (1.32)$$

где $\bar{x}^{(0)}$ – значение вектора \bar{X} , полученное методом Боннера; $W^{(i)}$ – величина W , полученная на первом шаге поиска при варьировании первой компонентой вектора $\bar{x}^{(0)}$; $\bar{x}^{(j-1)}$ – значение вектора \bar{x} полученное на $(j-1)$ -м шаге; $W^{(j)}$ – величина W , полученная на j -м шаге поиска при варьировании j -й компонентой вектора $\bar{x}^{(j-1)}$; n – число шагов в одном цикле поиска; $g = 1, 2, \dots$

Второй цикл поиска начинается снова с изменения первой компоненты вектора \bar{x} и т.д. Процесс поиска заканчивается если на протяжении целого цикла значение \bar{x} не меняется, т. е.

$$\bar{x}^{(n+g)} = \bar{x}^{(g)} \quad (1.33)$$

Рассмотрим возможность применения изложенного метода для классификации производственных структур Саларской станции биологической очистки сточных вод – ГУП «Сувсоз». Элементами производственных структур будем считать следующие цехи и отделы станции: механической очистки, обработки осадка, биологической очистки, обеззараживания воды, аэротенки, первичные и вторичные радиальные отстойники, насосно-воздуходувная станция, химлаборатория, отделы главного механика и энергетика, отдел обработки илов и осадка.

Проведен анализ производственных структуры 12 очистных сооружений городов РУз. 1-4 г.Ташкент; 5 – г. Андижан; 6 – г. Фергана; 7 – г. Карши; 8 – г. Навои; 9 – г. Бухара; 10 – г. Ургенч; 11 – г. Нукус; 12 – г. Наманган.

Матрица расстояний $D = |d_{ij}|$ показана в табл. 1.3 и 1.4 из которого видно наиболее близкими являются производственные структуры. 3-Саларская станция биологической очистки сточных вод и 6 – Ферганская городская станция очистки сточных вод ($d_{36}=0.2$). Из (1.28) следует, что $0 \leq d_{ij} \leq 1$. Производственные структуры будем считать похожими, если расстояние между ними $d_{ij} \leq 0,5$.

Таблица 1.3. Матрица расстояний

I_i I_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0,3	0,56	0,93	0,33	0,6	0,73	0,55	0,4	0,63	0,7	0,67
2	0,3	0	0,5	0,92	0,44	0,56	0,7	0,33	0,5	0,69	0,75	0,64
3	0,56	0,5	0	0,89	0,33	0,2	0,5	0,43	0,43	0,69	0,67	0,43
4	0,93	0,92	0,89	0	0,91	0,78	0,63	0,82	0,82	0,81	1,00	0,56
5	0,33	0,44	0,33	0,91	0	0,43	0,63	0,38	0,38	0,73	0,57	0,56
6	0,6	0,56	0,2	0,78	0,43	0	0,33	0,5	0,29	0,62	0,71	0,29
7	0,73	0,7	0,5	0,63	0,63	0,33	0	0,67	0,5	0,62	0,88	0,29
8	0,55	0,33	0,43	0,82	0,38	0,5	0,67	0	0,6	0,75	0,78	0,6
9	0,4	0,5	0,43	0,82	0,38	0,29	0,5	0,6	0	0,57	0,63	0,44
10	0,63	0,69	0,69	0,81	0,73	0,62	0,62	0,75	0,57	0	0,87	0,57
11	0,7	0,75	0,67	1,00	0,57	0,71	0,88	0,78	0,63	0,87	0	0,78
12	0,67	0,64	0,43	0,56	0,56	0,29	0,29	0,6	0,44	0,57	0,78	0

Таблица 1.4.
Множества
сходных структур

I_j	$\pi(I_j)$
1	{2, 5, 9}
2	{1, 3, 5, 8, 9}
3	{2, 5, 6, 7, 8, 9, 12}
4	\emptyset
5	{1, 2, 3, 6, 8, 9}
6	{3, 5, 7, 8, 9, 12}
7	{3, 6, 9, 12}
8	{2, 3, 5, 6}
9	{1, 2, 3, 5, 6, 7, 12}
10	\emptyset
11	\emptyset
12	{3, 6, 7, 9}

1.6. Технический регламент и автоматизация технологических процессов очистке сточных вод (на примере Саларской станции аэрации ГУП «Сувсоз»)

Технологическая схема ССА ГУП «Сувсоз» подразделяются на следующие цеха (рис. 1.7):

- цех механической очистки и обработки осадка;
- цех биологической очистки и обеззараживания сточных вод;
- отдел главного механика;
- отдел главного энергетика;
- отдел химлаборатории.

Площадь Саларской станции – 82 га. Проектная мощность – 1120000 м³/сутки.

Структура технологии очистки сточных вод на Саларской станции аэрации представлен на рис. 1.8, где показана входные и выходные технологические связи между отдельными технологическими агрегатами.

Для автоматизации процесса необходимо, чтобы был выбран наиболее точный критерий управления процессом, т.е. обобщенный показатель, характеризующий качество работы объекта управления

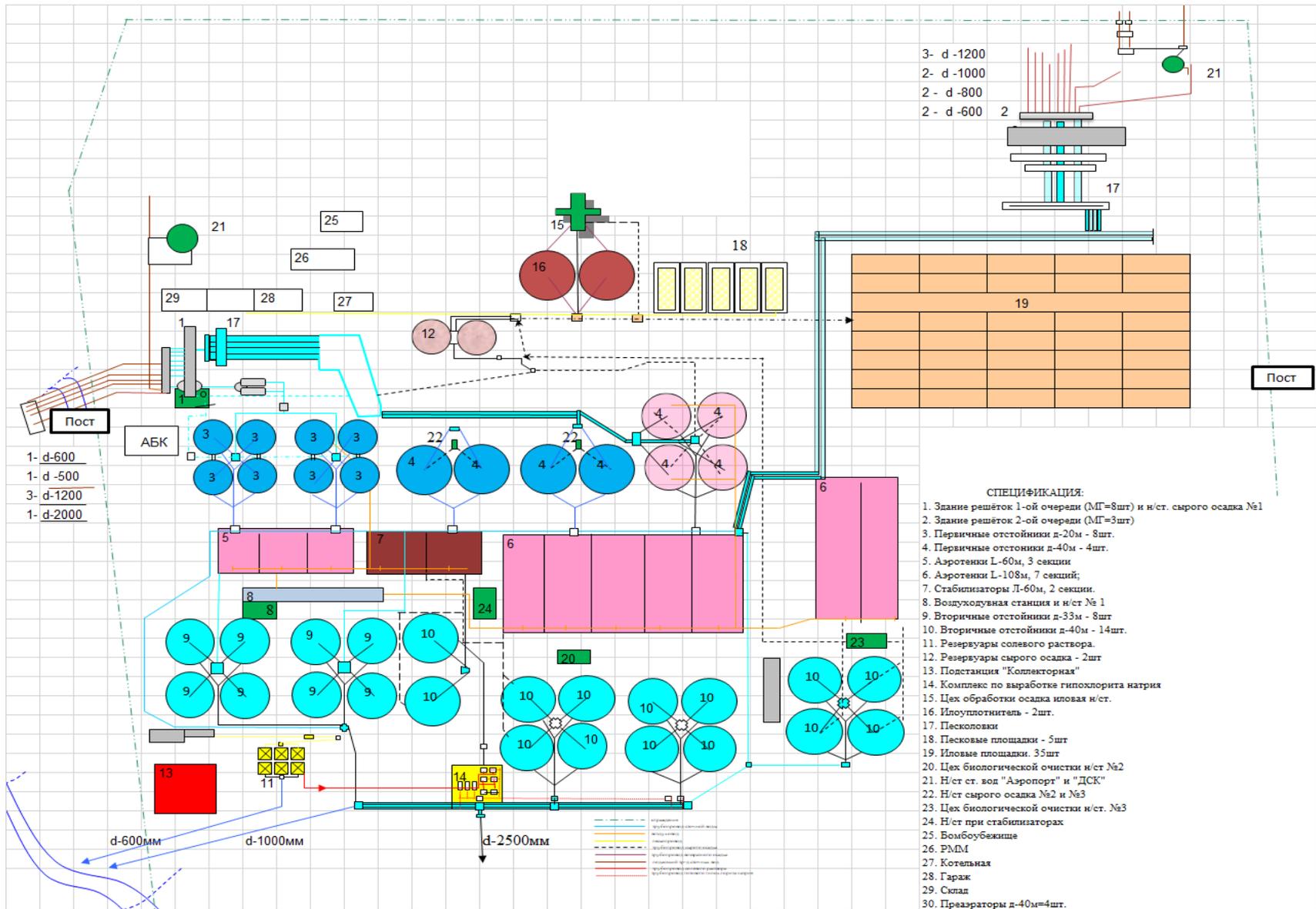


Рис. 1.7. Схема Саларской станции аэрации.

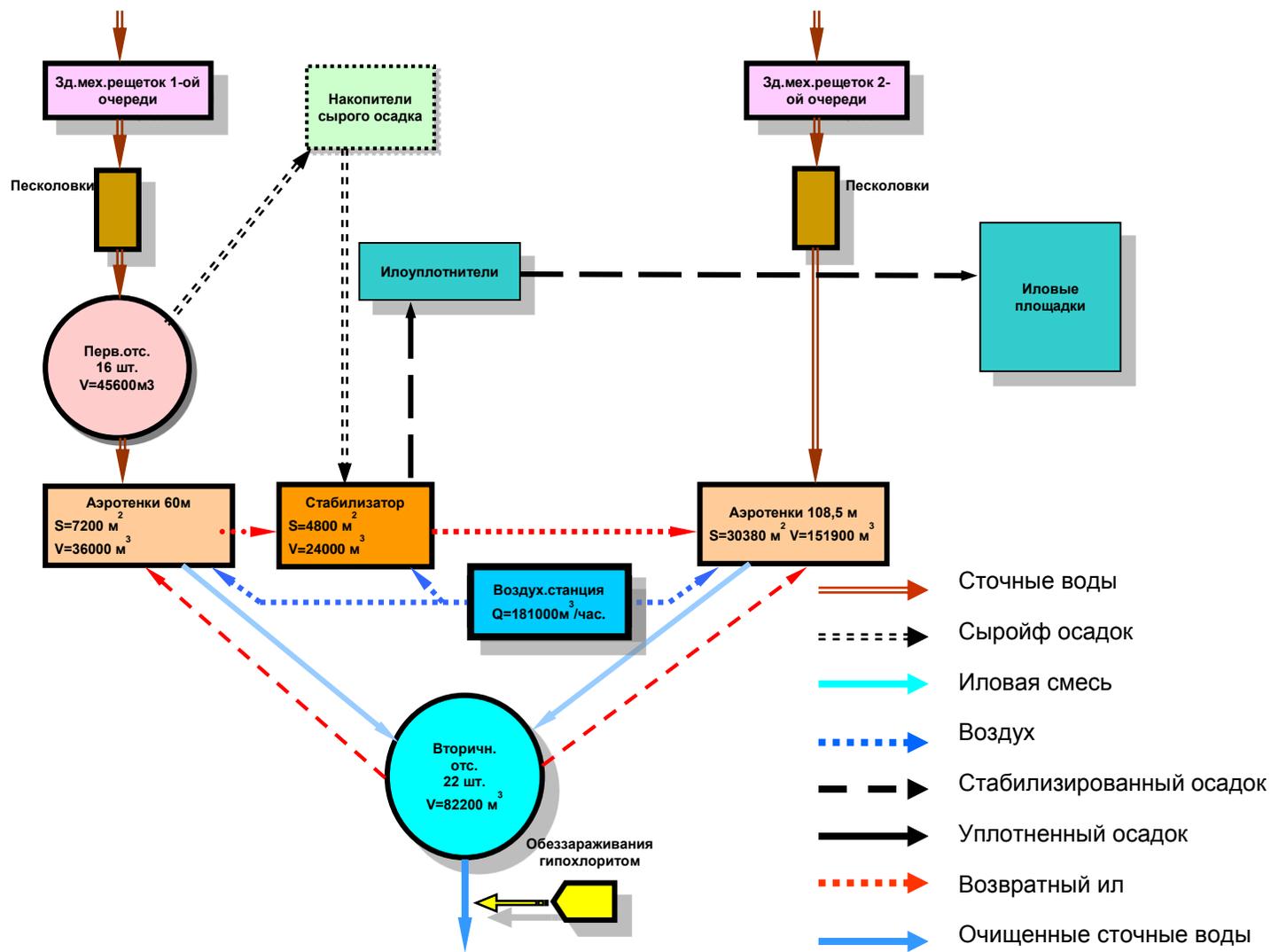


Рис.1.8. Структура технологии очистки сточных вод на ССА.

в целом.

Как видно из этой схемы система водоотведения - это сложный комплекс рассредоточенных сооружений, связанных единым технологическим циклом.

Процесс очистки сточных вод ставит перед системами автоматизации ряд следующих задач:

- автоматический контроль за параметрами процесса;
- автоматическое регулирование параметров процесса;
- дистанционное управление технологическими потоками, сооружениями и аппаратами, телеуправление.

Механическая очистка. Сточная вода поступает в приемную камеру, затем в механизированные решетки, где происходит задержание крупных загрязнений, затем вода поступает в песколовки, где осаждаются и удаляются не растворимые минеральные примеси, далее вода идет в первичные отстойники, здесь из сточных вод выделяются взвешенные вещества.

Биологическая очистка. Из первичных отстойников вода поступает в аэротенк, где при помощи микроорганизмов происходит биологическая очистка воды, затем смесь воды и ила идет во вторичные отстойники, там происходит разделение смеси на воду, циркуляционный или избыточный.

Доочистка. После вторичных отстойников вода поступает в фильтры, где происходит задержание остаточных загрязнений на фильтрующей загрузке.

Обеззараживание воды происходит в контактном резервуаре гипохлоритом натрия, затем обеззараженная вода сбрасывается.

Обработка осадка. Избыточный ил из вторичных отстойников поступает в илоуплотнитель, где уплотняется и уже уплотненный ил идет в метантенк, туда же поступает сырой осадок и отбросы, образованные в первичных отстойниках и решетках. После метантенков уже сброженный осадок идет в фильтр-пресс для обезвоживания и далее проходит термическую сушку.

Параметрами качества очищенной воды являются: реакция среды рН; содержание взвешенных веществ; БПК_{полн}; температура.

В цехе механической очистки установлены механические грабли, которые предназначены для задержания крупных механических примесей.

Поступающая сточная вода до здания решеток имеет следующие химические показатели (табл. 1.5):

Таблица 1.5.

БПК	ХПК	Температура	pH	Нитриты	Нитраты	Азот аммиака	Взвешенные вещества	ОМЧ	Коли индекс
29,6	138	23	7,72	0,054	0,15	8,6	70,0	58*10 ³	23*10 ⁶

После механических граблей сточная жидкость попадает в первичные радиальные отстойники, предназначенные для оседания 30% взвешенных веществ и формирования сырого осадка.

На станции эксплуатируется 2 группы первичных отстойников:

1. Группа Д-20 м количестве 8 шт.
2. Группа Д-40 м в количестве 8 шт.

Была проведена исследовательская работа в ходе которой было выявлено, что целесообразно переоборудовать часть отстойников в преаэраторы. Поэтому 2 отстойника Д-20 м и Д-40 м переоборудованы в преаэраторы. После первичных отстойников сточная жидкость имеет следующие химические показатели (табл. 1.6):

Таблица 1.6.

БПК	Осадок по объему	Температура	pH	Взвешенные вещества	ОМЧ	Коли индекс
20,0	2,0	23	7,58	52,5	7200	23*10 ⁵

Образовавшийся сырой осадок из отстойников выпускается в резервуар сырого осадка 2 раза в сутки. Из отстойников Д-20 м под гидростатическим давлением, а из отстойников Д-40 м с помощью плунжерных насосов марки НП-50 производительностью 50 м³/ч.

После первичных отстойников осветленная сточная жидкость направляется на биологическую очистку.

Цех биологической очистки предназначен для извлечения из сточных вод органических, растворенных и взвешенных веществ, оставшихся после механической очистки.

Биологическая очистка происходит в аэротенках. На станции построена и введено в эксплуатацию 2 группы аэротенков:

1. Аэротенки длиной 60 м, шириной 40 м и глубиной 5 м, в количестве 5 секций.
2. Аэротенки длиной 108,5 м, шириной 40 м и глубиной 5 м, в количестве 7 секций.

В аэротенках происходит окисление органических веществ.

Биохимическими окислителями в аэротенках являются аэробные микроорганизмы, колонии которых и образуют активный ил. Для обеспечения нормальной жизнедеятельности этих

микроорганизмов-минерализаторов требуется достаточно большое количество воздуха равное $3,3 \div 3,7 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$. Только при таких условиях процесс будет происходить наиболее полно.

Потребность воздуха для одной секции аэротенка длиной 60 м равна:

$$(60 \text{ м} * 40 \text{ м}) * 3,3 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч} = 7920 \text{ м}^3/\text{ч}$$

О качестве ила в системе можно судить по составляющим его микроорганизмам и их количеству (табл. 1.7). В возвратном иле насчитывается от 600 до 1800 шт/мл простейших микроорганизмов.

Для сохранения нормальной активности ила требуется регулировать нагрузку на него по сухому веществу, дозу ила, возраст ила, его иловый индекс.

Доза ила в смеси	1-3г/л;
Доза возвратного ила	8-15
г/л;	
Иловый индекс	80-120 г/л;
Возраст ила	5-8 суток
Время пребывания сточной жидкости в аэротенках	2,5÷3
часа.	

Таблица 1.7.

60 м аэротенки, шт/мл	108 м аэротенки, шт/мл	Новый комплекс, шт/мл
Asp – 6	Asp – 8	Asp – 9
Epis – 347	Epis – 15	Vor – 6
Eup – 5	Eup – 8	Epis – 5
Rot – 1	Коловратки – 1	Cep – 2
Коловратки – 8	Vor – 7	Colp – 5
Frsel – 1	Lion – 1	Lion – 2
Par – 1	Прочие - 10	Param – 2
Прочие - 4		Eup – 1
		Прочие – 6
Всего - 1200	Всего - 1000	Всего – 760

После аэротенков иловая смесь поступает во вторичные отстойники. Вторичные радиальные отстойники предназначены для разделения иловой смеси: оседающий активный ил возвращается в аэротенки для повторного использования, а осветленная жидкость направляется на хлорирование. На станции построены и введены в эксплуатацию две группы вторичных отстойников:

1. Отстойники Д-33 м, в количестве 8 шт. Объем одного

отстойника равен 2400 м³.

2. Отстойники Д-40 м, в количестве 14 шт. Объем одного отстойника равен 4500 м³.

Время отстаивания составляет 1,5÷2 часа.

После вторичных отстойников сточная жидкость имеет следующие химические показатели (табл. 1.8):

Таблица 1.8.

рН	Температура	Взвешенные вещества	Азот аммиака	Нитриты	Нитраты	БПК	Коли индекс	ОМЧ
7,88	23	30,0	6,76	0,03	0,09	15,0	2800	23*10 ⁵

Перекачка активного возвратного ила из отстойников Д-33 производится с помощью илососов, работающих непрерывно, вертикального насоса марки ОВ-6-55 и одного низконапорного эрлифта Д-1200 мм.

Перекачка активного возвратного ила из отстойников Д-40 м осуществляется с помощью илососов, одного вертикального насоса марки ОВ-6-55, установленного в насосной станции отстойников № 11-18 и семи эрлифтов. Количество возвратного ила составляет 40% от общего количества иловой смеси.

Для перекачки 1 м³ ила требуется 2,5 м³ воздуха, тогда объем воздуха для эрлифтов будет равен:

$$Q = 2,5 \text{ м}^3 * 340000 \text{ м}^3/\text{сутки} = 850000 \text{ м}^3/\text{сутки} = 35400 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Воздух в систему аэрации подает насосно-воздуходувная станция. В здании станции установлено:

1. Вертикальные насосы марки ОВ-6-55, 1 шт, производительность 1 насоса составляет 2000 м³/час.

2. Нагнетатели марки 750-23-6, 2 шт, производительность одного нагнетателя составляет 45000 м³/час.

3. Нагнетатели марки 360-22-2,3 шт, производительность одного нагнетателя составляет 14000 м³/час.

4. Нагнетатель марки ТВ-300-1,7, 1 шт, с производительностью 18000 м³/час.

Две секции 60 м аэротенков были переоборудованы под стабилизатор. В секциях стабилизатора происходит нитрификация сырого осадка.

Сырой осадок из первичных отстойников с влажностью 94-95%, в количестве 50-75 м³/сутки, плунжерными насосами перекачивается в резервуар сырого осадка, а затем насосами марки НФ – 6, перекачивается в стабилизатор. Сюда же подается избыточный активный ил из системы. Интенсивность аэрации в

стабилизаторе оставляет 6,0 м³/м²/час. Время стабилизации составляет 10-20 суток, за это время происходит распад 50% всех органических веществ. Концентрация ила в стабилизаторе составляет 10 – 15 г/л.

Микробиологические исследования (табл. 1.9) показали, что сырой осадок оказывает положительное влияние на рост микроорганизмов активного ила.

Таблица 1.9.

60 метровые аэротенки, шт/мл	108 метровые аэротенки, шт/мл	Новый комплекс, шт/мл	Стобилизатор, шт/мл
Asp – 6	Asp – 8	Asp - 9	Asp – 22
Epis – 34	Eup - 8	Vor – 6	Arsel - 93
Eup – 5	Epis – 15	Epis – 5	Epis – 19
Rot – 1	Kolov – 1	Cep – 2	Eng – 31
Kolov – 8	Vor – 7	Colp – 5	Acineta – 1
Arsel – 1	Lion - 1	Lion – 2	Oxyt – 1
Par – 1	Прочие - 10	Param – 2	Lion – 2
		Eup – 1	Cep – 2
		Прочие - 6	Kolov – 2
			Rot – 2
			Nem – 1
			Прочие - 158
Всего - 1200	Всего - 1000	Всего - 760	Всего – 3540

После стабилизатора смесь с удельным сопротивлением порядка 10 – 40*10¹⁰ см/г, насосами марки ФГ – 144 перекачивается на илоуплотнитель, с концентрацией 8 – 12 г/л.

На илоуплотнителе смесь уплотняется в течении 8-12 часов до влажности 95-96% и концентрации 35-40 г/л. Уплотненный осадок с помощью плунжерных насосов ПН – 50, направляется на иловые площадки. Ежедневно из стабилизатора на илоуплотнитель скачивается по 200 м³/сутки стабилизированного ила с влажностью 95-96%. На иловые площадки за месяц скачивается:

$$200 \text{ м}^3 / \text{сутки} * 30 \text{ дней} = 6000 \text{ м}^3 = 6 \text{ тонн.}$$

Годовое количество равно:

$$6 \text{ тонн} * 365 \text{ дней} = 2190 \text{ тонн.}$$

Осветленная жидкость после вторичных отстойников направляется на обеззараживание. Обеззараживание производится гипохлоритом натрия, который получают на месте методом электролиза раствора хлористого натрия.

Объем вырабатываемого гипохлорита составляет 402 м³.

Задаваемая доза по активному хлору составляет 3-4 г/литр. Остаточный хлор на сбросе поддерживается в пределах 1,5 – 1,8 мг/литр. После обеззараживания сточная вода сбрасывается в реку Салар. Фактический сброс разделен на два трубопровода Д-2500 мм и Д – 1200 мм.

Категория сточных вод: нормативно очищенные.

Категория водопользования: рыбохозяйственная.

Фактический расход сточных вод для установления ПДС = 850000 – 870000 м³/сутки. После обеззараживания сточная жидкость имеет следующие химические показатели (табл. 1.10):

Таблица 1.10.

рН	Температура	БПК	ХПК	Взвешенные вещества	Азот аммонийный	Нитриты	Нитраты	Коли индекс	ОМЧ
8,4	23	15,0	95,0	20,0	3,06	0,03	0,33	760	900

Все анализы по контролю очистки сточных вод производятся в химлаборатории.

В отделе химического анализа сточной, жидкости производятся анализы воды по всем этапам очистки по 24 ингредиентам.

В отделе обработки илов и осадка ведется контроль за состоянием ила в смеси, дозу ила в возвратном иле, зольность и иловый индекс.

В бактериологическом отделе производятся баканализы сточной воды по всем этапам очистки. Определяется коли индекс, ОМЧ, а также проводится гидробиологический анализ возвратного ила на наличие полезных микроорганизмов.

1. Удовлетворительное работающий ил, имеет большое разнообразие простейших по видовому составу небольшом количественном преобладании какого-либо из видов. Постоянное наличие *Aspidiska*, *Zooglea*. Все организмы достаточно подвижны в оживленном состоянии.

2. Ил из регенератора имеет в своем составе прикрепленные инфузории *Vorticella convalaria*, *Epistylis*. В нем увеличено количество прикрепленных инфузорий и зооглей по сравнению с илом в аэротенки. Организмы подвижные.

3. Голодающий ил имеет мелкие размеры простейших, организмы становятся прозрачными, частично инфузории превращаются в цисты. Коловратки образуют цисты позже чем инфузории.

4. Нитрифицирующий ил. В нем постоянно присутствуют

коловратки, *Philodina*, *Collidina* и другие виды. Количественно преобладают прикрепленные инфузории *Vorticella convalaria*, *Carchesium*, *Arsella* и крупные амебы. Возможно присутствие в большом количестве малощетинковых червей *Aeolozoma*.

5. Ил при недостатке кислорода. В нем *Vorticella convalaria* раздувается в виде шара, некоторые лопаются и исчезают. *Opercularia* с замкнутым ресничным диском, неподвижные. Коловратки неподвижные, застывшие в вытянутом состоянии, отмирающие. Большое количество жгутиковых. Из инфузорий присутствуют только *Paramecium caudatum*, как очень выносливый формы к недостатку кислорода, способной оживленно плавать в гниющем иле.

Бак анализ сточных вод производится 4 раза в неделю. На сегодняшний день эффективность очистки составляет 60-65%.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ

СТОЧНЫХ ВОД

2.1. Общие вопросы контроля и управления технологическими режимами очистки и использования производственных сточных вод

Трудности решения проблем очистки сточных и природных вод обусловлены сложностью физико-химических и биохимических процессов, лежащих в их основе, а также значительными капитальными затратами на сооружения очистных комплексов и технологических установок.

Основная задача заключающийся в разработке новых и максимальном повышении эффективности существующих методов очистки, снижающих себестоимость обработки 1 м³ воды и увеличивающих циркуляционные объемы воды в системах водоотведения.

Одним из путей решения этой задачи является непрерывное автоматический контроль, регулирование и я процессом очистки воды. В области очистки сточных и природных вод улучшенные показатели получают при автоматическом регулировании по характерным количественным и качественным параметрам, позволяющим вести процесс очистки в оптимальных режимах. Только в этих случаях такое регулирование позволяет эксплуатировать очистные сооружения с проектной нагрузкой, и получая воду заданного качества.

В технологический контроль входит определение количественных и качественных параметров [29].

К количественным параметрам относятся:

- уровень сточных вод;
- разность давления;
- расход воды (неочищенный, очищенный), воздуха;
- уровень осадка;
- давление.

К качественным параметрам относится:

- реакция среды рН;
- содержания взвешенных веществ;
- БПК полная;
- температура.

Так как, все существующие и строящиеся промышленные объекты в той или иной степени оснащаются средствами автоматизации, то необходимо решать следующие вопросы: с каких мест будут управляется те или иные участки объекта, где необходимо разместить пункты

управления, операторские помещения и какова будет взаимосвязь между ними, т.е. выбрать структуру управления.

Правильный выбор структуры управления объектом автоматизации обеспечивает эффективную его работу, снижает стоимость системы управления, повышает ее надежность, ремонтпригодность и так далее.

Управление современными сложными объектами, состоящими из отдельных частей, удаленных на значительное расстояние друг от друга, осуществляется системой, имеющей многоуровневую структуру [38].

Основными объектами регулирования являются:

решетки - управление процессом очистки по разности давлений до и после нее;

песколовки - управление процессом удаления осадка из пескового приямка по уровню песка;

первичные отстойники - управление процессом удаления сырого осадка по уровню осадка;

аэротенк - управление процессом подачи возвратного активного ила и воздуха по расходу сточных вод, поступающих в аэротенк;

вторичный отстойник - управление процессом удаления избыточного активного ила по уровню ила;

илоуплотнитель - управление процессом выгрузки уплотненного ила по времени уплотнения;

контактный резервуар - управление процессом хлорирования воды по расходу сточных вод после вторичных отстойников;

метантенк - регулирование температурой сброживаемого осадка с помощью подачи острого пара, управление процессом отвода газа в газгольдер, осадка в фильтр-пресс;

фильтр-пресс - управление процессом выгрузки осадка и подачи иловой воды по уровню осадка.

Таким образом, критерием управления является (2.1)

$$KY=f(L_{пр. кам}, T_{пр. кам}, D_{реш}, L_{песка в песк.}, L_{осадка в перв. отст}, L_{осадка во втор. отст}, F_{расх. сточ. вод в труб. перед аэрот}, D_{фильтра}, F_{рас. хлор. воды}, T_{осадка в мететенке}, P_{газа в мететенке}). \quad (2.1)$$

На точность САК РУ влияют возмущающие воздействия.

На рисунке 2.1 приведена технологическая схема очистки сточных вод и поэтапный контроль параметров очищаемых стоков.

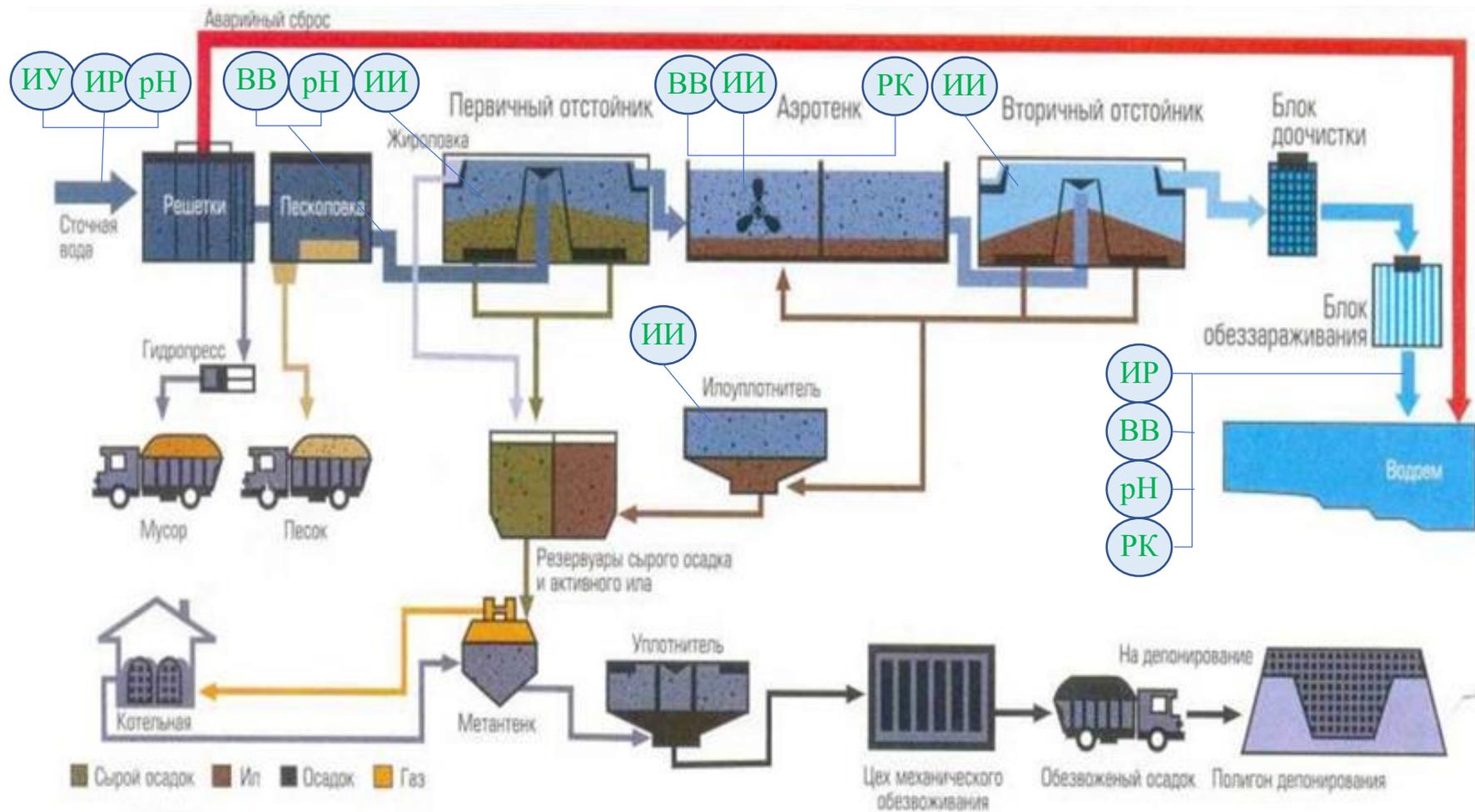


Рис. 2.1. Технологическая схема очистки сточных вод и поэтапный контроль параметров очищаемых стоков.

ИУ – измерения уровня, ИР – измерения расхода, ВВ – измерения содержания взвешенных веществ, ИИ – измерения содержания ила, РК – измерения содержания растворенного кислорода

Возмущающие воздействия – это факторы, произвольно действующие на значения регулируемых параметров, вызывая нежелательное их отклонение от заданных.

Основными возмущающими воздействиями являются:

- приемная камера – температура сточных вод;
- решетка – разность давлений;
- аэротенки – расход воздуха, расход циркуляционного активного ила;
- фильтры – разность давлений;
- метатенк – температура осадка.

2.2. Выбор и обоснование технических средств автоматизации

Описание работы основного сооружения - песколовки. Для улавливания из сточных вод песка и других минеральных нерастворённых загрязнений применяют песколовки. Принцип действия песколовки основан на том, что под влиянием сил тяжести частицы, удельный вес которых больше, чем удельный вес воды, по мере движения их вместе с водой в результате выпадают на дно.

Рассматриваемая горизонтальная песколовка состоит из рабочей части, где движется поток и осадочной, назначение которой собирать и хранить выпавший песок до его удаления. Время пребывания жидкости в горизонтальной песколовке принимают обычно 30 – 60 с, расчётный диаметр частиц песка 0,2 - 0,25 мм, скорость движения сточной воды 0,1 м/с [32].

Структурная схема автоматизированного системы управления (АСУ) приведена на рис. 2.2 и функциональная схема автоматизации управления процессов улавливания из сточных вод песка и других минеральных нерастворённых загрязнений приведена на рис. 2.3.

Описание структурной схемы АСУ.

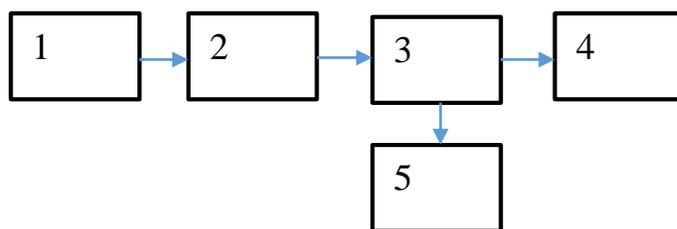


Рис. 2.2. Структурная схема АСУ: 1 - распределительная камера; 2 - решетка; 3 – горизонтальная песколовка; 4 - первичный отстойник; 5 - песковой бункер.

Система состоит из:

- распределительной камеры;
- решетки;
- горизонтальной песколовки;
- первичного отстойника;
- пескового бункера.

Данная система работает следующим образом: Сточная вода приходит в приемную (распределительную) камеру. Затем проходит через решетки, на решетках задерживаются крупные загрязнения. После вода поступает в песколовки. Задержанный песок из песколовок отводится в песковые бункера и далее на песковые площадки. Из песколовок вода поступает в первичный отстойник.

Выбор и обоснование контролируемых параметров. Автоматические устройства в песколовках применяют для распределения и регулирования количества поступающих сточных вод, а также для удаления песка при достижении им предельного уровня.

Для нормальной и эффективной работы песколовки необходимо следить и контролировать следующие параметры:

- расход, так как песколовка рассчитывается на 30-60 с пребывания в ней воды, если расход будет превышать расчётный, то сокращается время пребывания воды в песколовке, и она полностью не очищается. Если уменьшить расход, увеличится время очистки, что ведёт к удорожанию обработки воды;
- уровень осадка, если он будет подниматься выше допустимой величины, то будет происходить его взмучивание, и вода будет загрязняться ранее осевшими веществами;

Выбор и обоснование технических средств автоматизации:

1) Расход воды. Для измерения расхода выбран следующий расходомер - ультразвуковой расходомер UFM 400. Преимущество его -

отсутствуют потери давления, экономичен, легко устанавливается без прерывания потока. Выходной сигнал 0...5 мА. Измеряемый расход удовлетворяет диапазону измерения.

2) Уровень осадка. Для контроля уровня осадка в песколовке будем использовать мутномер оптический АОМ 202. Он предназначен для измерения оптической плотности жидких сред, содержащих взвешенные вещества. Выходной сигнал 0..5 мА.

Описание контура управления. Для регулирования расхода жидкости применяем следующий комплект приборов: сигнал от датчика UFM 400 с величиной выходного сигнала 0...5 мА приходит на УВК. По определённому алгоритму сравнивается с заданным значением и вырабатывает соответствующее управляющее воздействие, которое поступает на реверсивный магнитный пускатель МКР- 0-58. Он в свою очередь управляет электрическим исполнительным механизмом МЭМ - 4/1, который установлен на трубопроводе подачи сточной воды.

Описание системы структуризации. Структуризацию автоматизированного производственного процесса можно разделить на три основных уровня:

1. уровень измерения (нижний уровень);
2. уровень подачи информации (средний уровень);
3. уровень отображения информации контроля автоматизирования (верхний уровень).

На нижнем уровне датчик воспроизводит контролируемую величину и образует её в сигнал удобный для передачи на расстоянии.

Исполнительный механизм предназначен для силового воздействия на конечное звено автоматического устройства - регулирующего или управляющего органа.

На уровне измерения происходит взаимодействие датчиков и исполнительных механизмов, оказывающих управляющее воздействие.

Далее преобразованный сигнал на среднем уровне отправляется на контроллер, где происходит сбор информации.

Необходимая собранная информация передается на верхний уровень. Передача этой информации происходит при помощи модема.

В вычислительном комплексе происходит обработка информации, которая передается в контролируемые органы.

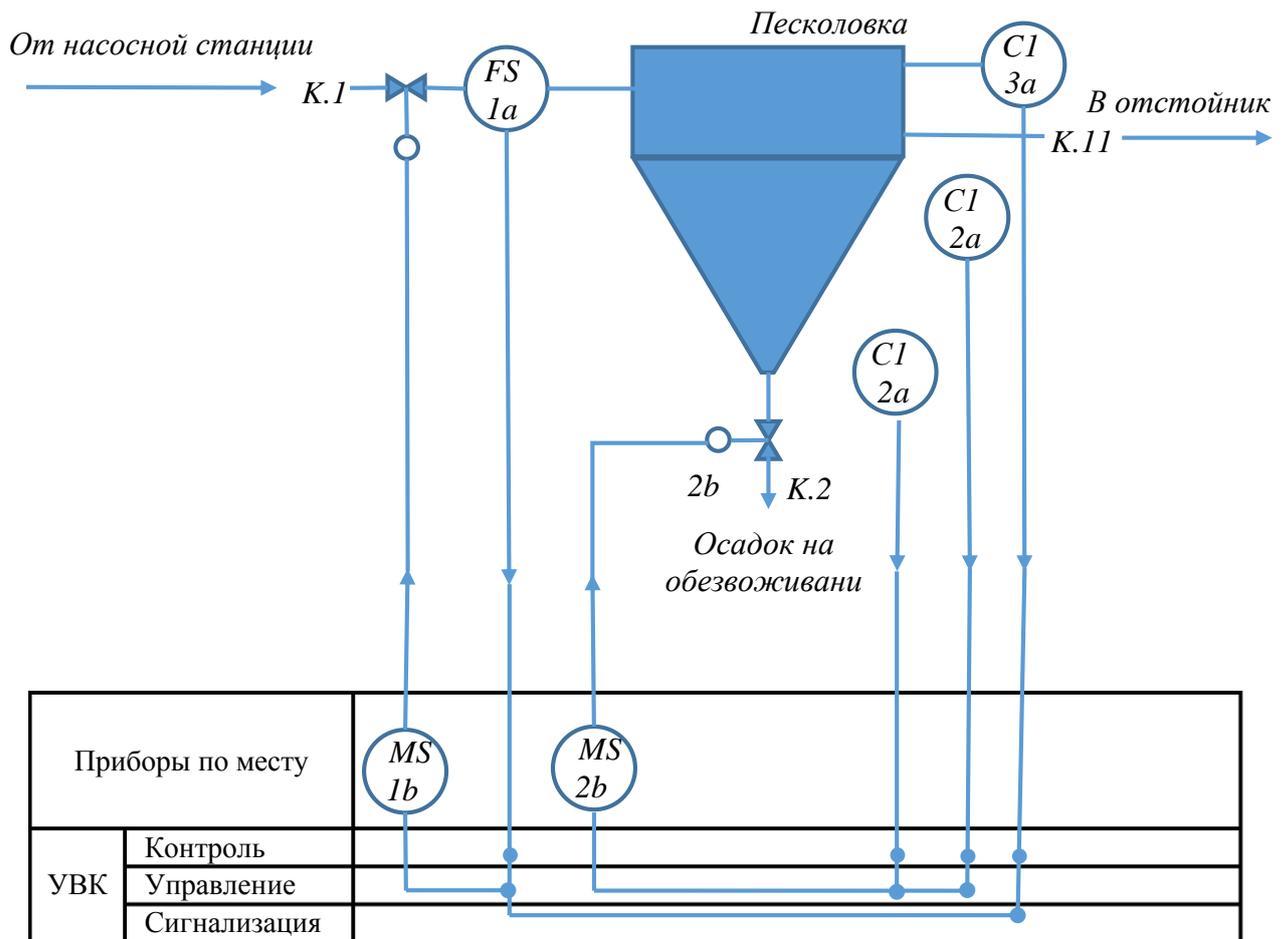


Рис. 2.3. Функциональная схема автоматизации.

Автоматизация процессов водоподготовки и очистки стоков (АСУТП) реализуется на основе:

- Контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА);
- Станций автоматизации с установленными программами управления;
- Исполнительных устройств для дистанционного или автоматического управления технологическими режимами и оборудованием.

Программное обеспечение автоматизация процессов водоподготовки и очистки стоков (АСУТП) обеспечивает сбор и обработку информации о любых технологических процессах водоподготовки и водоочистки, её визуализацию, хранение и передачу на верхний уровень в заданном режиме [39].

Системы автоматики:

- Автоматизация приготовления реагентов;
- Автоматизация технологического процесса очистки воды;
- Автоматизация лабораторных анализов и экспериментов.

Каждая система выполняется в развитии - от нижнего уровня (малая автоматизация) до верхнего (АСУТП).

Автоматизация приготовления реагентов. Приготовление реагентов состоит из следующих стадий:

- растворение сернокислого алюминия, ПАА;
- доведение раствора извести до рабочей концентрации;
- перекачивание растворов сернокислого алюминия и ПАА в баки для хранения;
- доведение концентраций растворов до рабочих;
- контроль уровня растворов в баках;
- подача растворов в технологическую линию.

Система автоматизации нижнего уровня выполняет следующие функции [5]:

- контролирует подачу воды на растворение по уровню или расходомеру;
- контролирует уровни растворов в рабочих емкостях;
- блокирует оборудование и подает сигнал о превышении предельных уровней (верхних, нижних) растворов в рабочих емкостях;
- контролирует работу насосов подачи растворов в технологическую линию.

Система автоматизации водоочистки и водоподготовки поддерживает следующие базовые функции:

- отображение на дисплее начальника смены или начальника участка состояния узлов оборудования, уровней растворов;
- расчет соотношения количества воды и реагента в зависимости состава реагента и от потребности производства;
- передача информации начальнику смены или начальнику участка о запасах реагентов на складе и в рабочих резервуарах с прогнозом их расхода;
- интеграция в систему управления технологическим процессом.

Автоматизация технологического процесса (на примере станции механической очистки промстоков). Технологический процесс очистки сточных вод состоит из следующих этапов:

- подача сточной воды в приемный узел;
- прохождение потока сточной воды по лотку на песколовки (2 шт.);
- прохождение потока сточной воды по измерительному лотку;
- подача в поток сточной воды реагентов: сернокислого алюминия, известкового молока и ПАА с заданным расходом;
- перемешивание сточной воды и реагентов в смесительной камере воздухом;
- подача сточной воды по лотку в нефтеловушки;

- отстаивание сточной воды в нефтеловушках и съём с поверхности всплывших нефтепродуктов;
- подача сточной воды на эжекторы насосной станции;
- насыщение сточной воды воздухом на эжекторах;
- подача обработанной сточной воды на флотаторы;
- осветление сточной воды на флотаторах и съём флотошлама;
- сброс очищенной сточной воды в канализационный коллектор для подачи на районные очистные сооружения (РОС).

Дополнительно в технологической цепочке выполняются следующие работы:

- измерение *pH* сточных вод до и после обработки;
- дистанционный отбор проб сточных вод до и после обработки;
- удаление осадка из нефтеловушек и флотаторов;
- удаление флотошлама;
- управление работой насосной станции и эжекторов;
- распределение потоков сточной воды по оборудованию.

Система автоматизации технологического процесса очистки сточной воды может выполнять следующие функции:

- контроль подачи воды в приемный узел (наличие потока, расход, состояние задвижек и т.п.);
- измерение и контроль расхода сточных вод в лотке;
- измерение и контроль расхода подачи в поток сточной воды реагентов;
- измерение и контроль уровня осадка в нефтеловушках и флотаторах;
- приборный контроль процесса эжектирования (измерение расхода воздуха и сточной воды, контроль их соотношения, контроль состояния насосов, задвижек и т.п.).

По мере развития, система может дополняться следующими функциями:

- дистанционная установка расхода каждого реагента, подаваемого в поток сточной воды;
- учет расхода реагентов и сточной воды;
- дистанционная передача величины *pH* (а также других показателей по требованию специалистов и на которые есть приборы или датчики контроля) в ходе очистки и по окончании процесса для отображения на дисплее начальника смены или начальника участка;
- дистанционное управление отдельными видами оборудования;
- отображение на дисплее начальника смены или начальника участка состояния оборудования, расхода растворов, параметров сточной воды и других показателей;
- автоматическое формирование протоколов по проходящим

процессам с записью их в базу данных;

- автоматический расчет доз и концентраций растворов для управления технологическим процессом;
- связь с системой автоматизации лабораторных анализов и экспериментов для оперативной корректировки хода технологического процесса.

Автоматизация лабораторных анализов и экспериментов.

Система автоматизации лабораторных анализов и экспериментов предназначена для повышения эффективности и сокращения времени проведения лабораторных исследований, предназначенных для управления технологическим процессом очистки сточных вод. Система состоит из одного или нескольких компьютеров, соединенных между собой в сеть, в которую также включены измерительные приборы, имеющие стандартный выход и автоматизированные лабораторные стенды [50].

Система имеет программное обеспечение, специализированное под задачи лаборатории, в т.ч. алгоритм проведения эксперимента, запись данных эксперимента в базу данных и их обработку, построение таблиц, графиков, вывод информации по заданным формам, передачу информации на другие участки. Перечень выполняемых системой задач является гибкой функцией и может подстраиваться под текущие требования.

Информация базы данных системы совместно с информацией базы данных системы управления процессом могут стать основой построения системы ситуационного управления или построения математических моделей процесса на основе статистических данных.

Элементы совершенствования лабораторного контроля технологических процессов. Для совершенствования лабораторного контроля технологических процессов, требуется проведение следующих мероприятий:

- установка приборов контроля параметров технологических процессов на тех процессах и для тех параметров, где это возможно;
- оснащение лабораторий приборами, реактивами и лабораторным оборудованием для повышения оперативности и точности измерений;
- создание базы данных измерений и программы по формированию нужной информации;
- оснащение лабораторий современными методиками измерений, руководящими материалами.

Технологический процесс очистки сточных вод состоит из следующих этапов:

- подача сточной воды в приемный узел;

- подача и очистка сточной воды на решетках (2-3 шт.)
- прохождение потока сточной воды по лотку на песколовки (2 шт.);
- подача сточной воды в первичные отстойники;
- отстаивание сточной воды в отстойниках;
- подача сточной воды в аэротенки;
- перемешивание сточной воды в аноксидной зоне аэротенков
- насыщение сточной воды воздухом в аэротенках;
- осветление сточной воды во вторичных отстойниках;
- обеззараживание очищенной воды;
- сброс очищенной сточной воды в канализационный коллектор
- стабилизация и рецикл активного ила
- подача реагентов для обработки осадка

Дополнительно в технологической цепочке выполняются следующие работы [72]:

- измерение pH сточных вод до и после обработки;
- дистанционный отбор проб сточных вод до и после обработки;
- удаление осадка из песколовок и отстойников;
- управление работой насосной и воздуходувной станций;
- распределение потоков сточной воды по оборудованию.

2.3. Методы и технологические схемы контроля в системах очистки сточных вод

Методы, применяемые для очистки сточных вод, могут быть разделены на три группы: 1) механические; 2) физико-химические и 3) биологические (Таблицы 2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Для ликвидации бактериального загрязнения сточных вод применяют их обеззараживание (дезинфекцию).

Механическая очистка производится для выделения из сточной воды находящихся в ней нерастворенных грубодисперсных примесей путем процеживания, отстаивания и фильтрования.

Для задержания крупных загрязнений и частично взвешенных веществ применяют процеживание воды через различные рода решетки и сита. Для выделения из сточной воды взвешенных веществ, частицы которых имеют большую или меньшую плотность, чем плотность воды, применяют отстаивание. При этом тяжелые частицы осаждаются на дно под действием силы тяжести, а легкие всплывают на поверхность.

Взвешенные частицы минерального происхождения, главным

образом песка, выделяют из сточных вод путем осаждения в сооружениях, называемых песколовками.

Основную массу более мелкой взвеси, преимущественно органического характера, выделяют из сточных вод в отстойниках.

Вещества, более легкие, чем вода - жиры, масла, нефть, смолы и другие всплывающие на поверхность вещества выделяются в сооружениях, называемых жироловушками, маслоуловителями, нефтеловушками и смолоуловителями. Эти сооружения применяются для очистки производственных сточных вод [75].

Наконец, для освобождения сточных вод от частиц очень мелкой суспензии, находящейся во взвешенном состоянии, применяют фильтрование сточных вод путем пропуска их через ткань (сетку) или слой зернистого материала, на поверхности и в толще которого задерживается выделяемая из сточных вод взвесь. Фильтрование находит применение при механической очистке главным образом производственных сточных вод.

Механическую очистку как самостоятельный метод применяют в тех случаях, когда достигаемое при ее применении освобождение сточных вод от загрязнений позволяет (по местным условиям и в соответствии с санитарными правилами) использовать осветленную воду для тех или иных производственных целей или спускать эти воды в водоем. Во всех других случаях механическая очистка служит предварительной стадией перед биологической очисткой [90].

Как показали данные эксплуатации отстойников на ряде очистных станций, в осадок выпадает не более 80% осаждающихся взвешенных веществ, т. е. не более 60% общей массы взвешенных веществ, находящихся в сточных водах. Более высокий эффект может быть получен путем применения различных средств интенсификации процесса осветления. К числу их относятся биокоагуляция, осветление со взвешенным фильтром и преаэрация с избыточным илом или без него.

Физико-химические методы очистки заключаются в том, что в очищаемую воду вводят какое-либо вещество — реагент (коагулянт и флокулянт). Вступая в химическую реакцию с находящимися в воде примесями, эти вещества способствуют более полному выделению нерастворенных примесей, коллоидов и части растворенных соединений и тем самым уменьшают их концентрацию в сточной воде; переводят растворимые соединения в нерастворимые или в растворимые, но безвредные; изменяют реакцию сточных вод, в частности нейтрализуют их; обесцвечивают окрашенную воду и пр.

Современные исследования свидетельствуют о возможности обеспечения глубокой очистки сточных вод физико-химическими

методами. Освоение такой очистки по стадиям позволяет резко интенсифицировать механическую очистку сточных вод или заменить биологическую очистку.

Биологические методы очистки основаны на жизнедеятельности микроорганизмов, которые способствуют окислению или восстановлению органических веществ, находящихся в сточных водах в виде тонких суспензий, коллоидов и в растворе и являющихся для микроорганизмов источником питания, в результате чего и происходит очистка сточных вод от органических загрязнений [86].

Существующие в настоящее время сооружения для биологической очистки сточных вод могут быть разделены на два основных типа:

- 1) сооружения, в которых очистка происходит в условиях, близких к естественным;
- 2) сооружения, в которых очистка происходит в искусственно созданных условиях.

Сооружения для биологической очистки в естественных условиях, в свою очередь, могут быть разделены на сооружения, в которых происходит фильтрование очищаемых сточных вод через почву (поля орошения и поля фильтрации), и на сооружения, представляющие собой водоемы (биопруды), заполненные протекающей очищаемой сточной водой. В сооружениях первого типа питание кислородом идет за счет непосредственного поглощения его микроорганизмами из воздуха. В сооружениях второго типа питание кислородом идет главным образом за счет диффундирования его через поверхность воды (реаэрация) или за счет механической аэрации. Климатические условия и большая занимаемая площадь ограничивают развитие естественных приемов биологической очистки сточных вод (биопруды, поля орошения, поля фильтрации).

Интенсивностью процесса очистки сточных вод в том или ином сооружении определяется окислительная мощность сооружения, под которой понимается число граммов кислорода, получаемое с 1 м³ сооружения в сутки и используемое для снижения биологической потребности в кислороде сточных вод, окисления аммонийных солей до нитритов и нитратов, а также для повышения содержания в сточных водах растворенного кислорода. Окислительная мощность для различных сооружений колеблется в широких пределах [98].

Снижение концентрации трудноокисляемых веществ, фиксируемое значением ХПК очищенных вод, возможно методом сорбции, например, активированным углем, и химическим окислением, например путем озонирования. Снижение концентрации солей возможно методами обессоливания, применяемыми в практике водоподготовки.

Очистка от биогенных элементов. Биологически очищенная вода содержит аммонийный азот и фосфор в значительной концентрации. Азот и фосфор способствуют усиленному развитию водной растительности, последующее непереносимое отмирание которой приводит к вторичному загрязнению водоема.

Подсчитано, что 1 мг азота продуцирует 10 мг водной растительности, а 1 мг фосфора — 115 мг.

Азот удаляют физико-химическими и биологическими методами. Первый метод заключается в повышении рН воды до 10—11 путем известкования (в результате получения NH_4OH) с последующей отдувкой аммиака воздухом в градирнях. Биологический метод осуществляется в две ступени. На первой ступени в аэротенке длительной аэрации при отсутствии углеродсодержащих загрязнений (удаленных в обычном аэротенке) интенсивно проходят процессы нитрификации. На второй ступени применяется денитрификатор — сооружение, изолированное от доступа воздуха. В анаэробных условиях бактерии-денитрификаторы используют для своей жизнедеятельности химически связанный кислород нитритов и нитратов и разрушают, таким образом, эти соединения, в результате чего выделяется молекулярный азот [102].

Фосфор удаляют химическим осаждением солями железа, алюминия, известью. Реагенты подают либо в сточную воду перед первичными отстойниками, либо в очищенный сток перед вторичными отстойниками, либо в аэротенк. Наиболее эффективным является последний вариант. Эффект удаления фосфора достигает 80% [101].

Дезинфекция очищенных сточных вод. В практике очистки сточных вод дезинфекцию осуществляют теми же приемами и средствами, что и при очистке природных вод. Наиболее часто применяют хлорирование газообразным хлором, а на станциях пропускной способностью до 1000 м³/сутки используют и хлорную известь. При соответствующем технико-экономическом обосновании допускается обеззараживание биологически очищенных вод гипохлоритом натрия, а также путем электролиза раствора NaCl [112].

Методы обработки осадка. При очистке сточных вод любым из описанных выше методов образуется осадок вследствие выпадения нерастворенных веществ в первичных отстойниках. Кроме того, в результате биологической очистки образуется большое количество осадка, который выделяется во вторичных отстойниках. Осадок состоит из твердых веществ, сильно разбавленных водой. В сыром состоянии при очистке бытовых и некоторых производственных вод этот осадок имеет неприятный запах и является опасным в санитарном отношении, так как

содержит огромное количество бактерий (в том числе могут быть и болезнетворные) и яиц гельминтов.

Для уменьшения количества органических веществ в осадке и придания ему лучших санитарных показателей осадок подвергают воздействию анаэробных микроорганизмов (сбраживанию) и аэробной стабилизации или в соответствующих сооружениях. К анаэробным сооружениям относятся септики, двухъярусные отстойники, метантенки.

Первые два типа сооружений выполняют одновременно две задачи: 1) выделение из сточных вод нерастворенных веществ путем отстаивания; 2) сбраживание образующегося осадка. Метантенки предназначены преимущественно для сбраживания осадка; реже они применяются для предварительной анаэробной очистки высококонцентрированных сточных вод.

Для уменьшения влажности осадка сточных вод и его объема служат иловые пруды (для небольших станций) и иловые площадки. Для обезвоживания осадка применяются различные механические приемы — вакуум-фильтрация, фильтрпрессование, центрифугирование. Создаются эффективные аппараты по термической сушке и сжиганию осадков. Важное значение приобретает утилизация осадков в качестве органоминерального удобрения и белково-витаминных добавок к рационам питания сельскохозяйственных животных.

Механическая очистка сточных вод состоит из следующих сооружений: решетки для задержания крупных веществ органического и минерального происхождения; песколовки для выделения тяжелых минеральных загрязнений (главным образом песка); отстойники для выделения осаждающихся веществ (главным образом органических); хлораторная установка с контактными резервуарами, в которых происходит контакт осветленной воды с хлором с целью уничтожения болезнетворных бактерий. После дезинфекции вода может быть спущена в водоем [99].

Схема биологической очистки сточных вод в аэротенках с механической аэрацией аналогична схеме для механической очистки и отличается от нее только введением перед отстойником аэротенках с механической аэрацией.

Приток сточных вод на очистную станцию колеблется как в течение суток, так и в течение года. Неравномерность притока сточных вод связана, как известно, с образом жизни жителей города, ходом производственных процессов на промышленных предприятиях, а также с иными факторами, оказывающими влияние на неравномерность расхода воды, в том числе и с временем года (в случае общесплавной канализации существенным образом на приток сточных вод влияет

состояние погоды). Количество загрязнений, поступающих со сточными водами на очистную станцию, также неравномерно, и в связи с этим во многих случаях требуется усреднение сточных вод [107].

Таблица 2.1. Способы очистки сточных вод



Таблица 2.2. Методы очистки сточных вод от примесей.

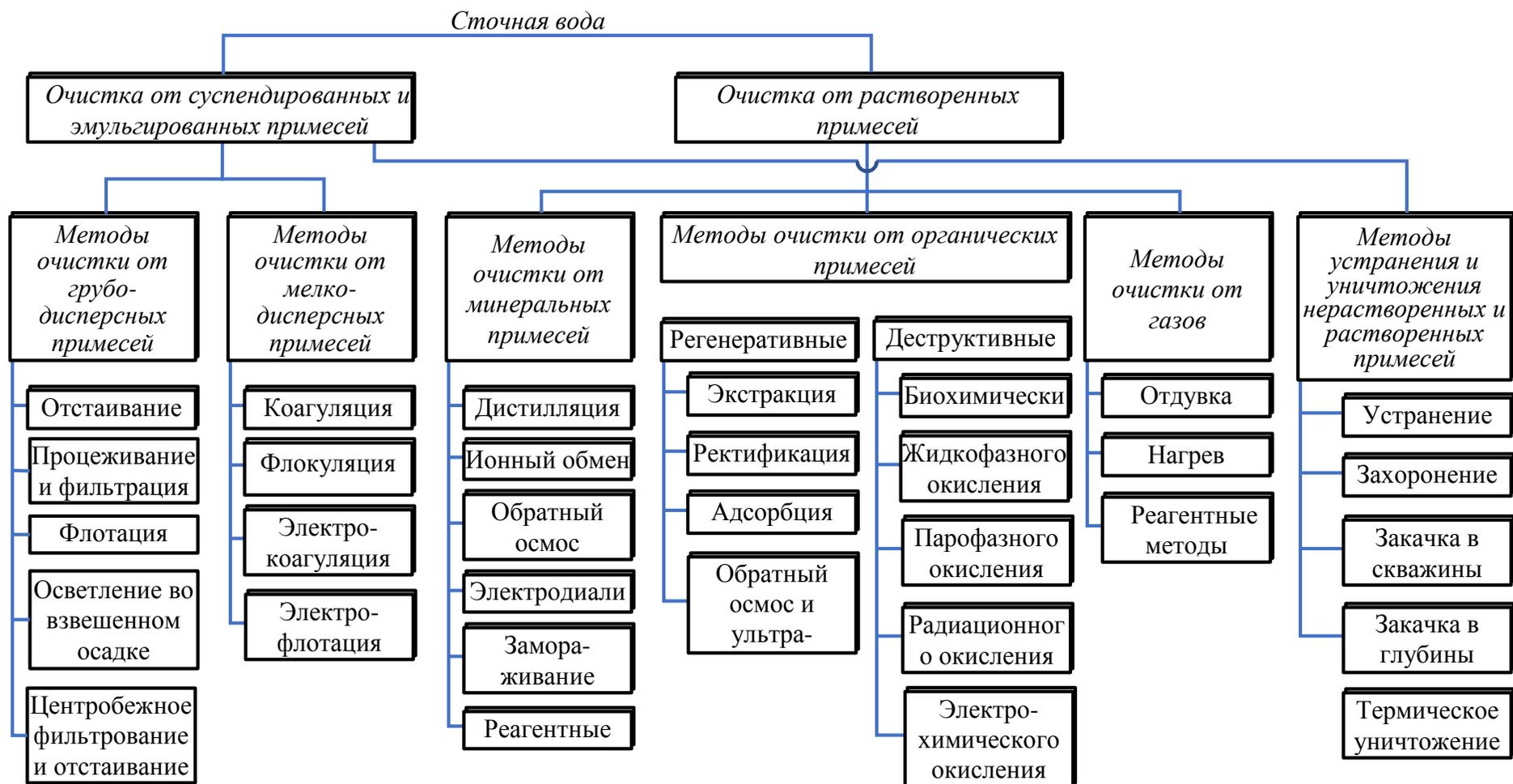


Таблица 2.3. Методы обработки сточных вод.



В таблица 2.4. Методы очистки производственных сточных вод для предприятий различных отраслей промышленности.

Отрасль промышленности, предприятие	Метод			
	Механи- ческий	Физико-хи- мический	Биоло- гический	Хими- ческий
Переработка продуктов питания (свекло-сахарные, крахмало-паточные, маслоделательные, консервные заводы, колбасные фабрики, бойни и пр.)	+	-	+	-
Обработка волокнистых веществ растительного происхождения (заводы тепловой мочки льна и конопли, ткацко-пряделльные, хлопкокрапильные и красильно-отбеливательные фабрики)	-	+	+	+
Обработка продуктов животного происхождения (шерстомойки, суконные фабрики, кожевенные и клееварные заводы, шелкомотальные цехи и т.п.)	+	-	+	+
Газификация твердого топлива (коксохимические заводы, газогенераторные станции на всех видах топлива, заводы по переработке сланцев и др.)	+	+	+	+
Переработка древесины (целлюлозные заводы, заводы, химической переработки древесины)	+	+	+	+
Бумажные фабрики	+	-	+	+
Гидролизные заводы	+	+	+	+
Получение и обработка черных и цветных металлов (металлургические, медеплавильные заводы, свинцово-цинковые комбинаты, машиностроительные заводы)	+	+	+	+
Горнорудная промышленность (шахты, обогатительные фабрики, углемойки)	+	+	-	+
Основная химическая промышленность (кислотные, содовые, кислородные заводы,	-	+	-	+

азотнотуковые комбинаты)				
Смешенная химическая промышленность (парфюмерные фабрики, лакокрасочные заводы и др.)	+	+	+	+
Нефтеперерабатывающая, нефтедобывающая и нефтехимическая промышленность	+	+	+	+

Примечание. Знак «+» обозначает необходимость применения, а знак «-» - отказ от применения данного метода очистки.

2.4. Особенности процесса биохимической очистки с точки зрения задач управления

Процесс биохимической очистки промышленных сточных вод в аэротенках весьма сложен с точки зрения автоматического управления, так как ход процесса в этих сооружениях непрерывно подвергается воздействию многих возмущающих факторов, большая часть которых в процессе эксплуатации не контролируется.

По многочисленным литературным данным, по данным лабораторий действующих станций биохимической очистки [6, 33, 137], а также по данным, полученным автором, был проведен статистический анализ диапазонов и частот изменения основных возмущающих параметров процесса: концентрации органических веществ в поступающих сточных водах, их расхода и температуры воды (рис. 2.4). Анализ показал, что эти параметры изменяются в широких пределах с значительными скоростями. Между тем ни при исследованиях, ни при проектировании сооружений биохимической очистки не учитывается изменения параметров очищенной воды под влиянием этих возмущений. В результате недостаточной и запаздывающей информации о ходе процесса и отсутствия эффективных средств управления процесс биохимической очистки протекает часто не в оптимальных режимах, что влечет за собой снижение производительности дорогостоящих очистных установок или ухудшает качество очистки.

Для повышения эффективности работы очистных сооружений следует непрерывно измерять основные возмущающие параметры и параметры состояния процесса, кроме того, необходима система автоматического управления (САУ), позволяющая оперативно вмешиваться в ход процесса. С целью создания таких САУ за последнее

время у нас и за рубежом ведется изучение процесса биохимической очистки как объекта автоматического регулирования, исследуются возможности и разрабатывается аппаратура для непрерывного измерения основных параметров [42].

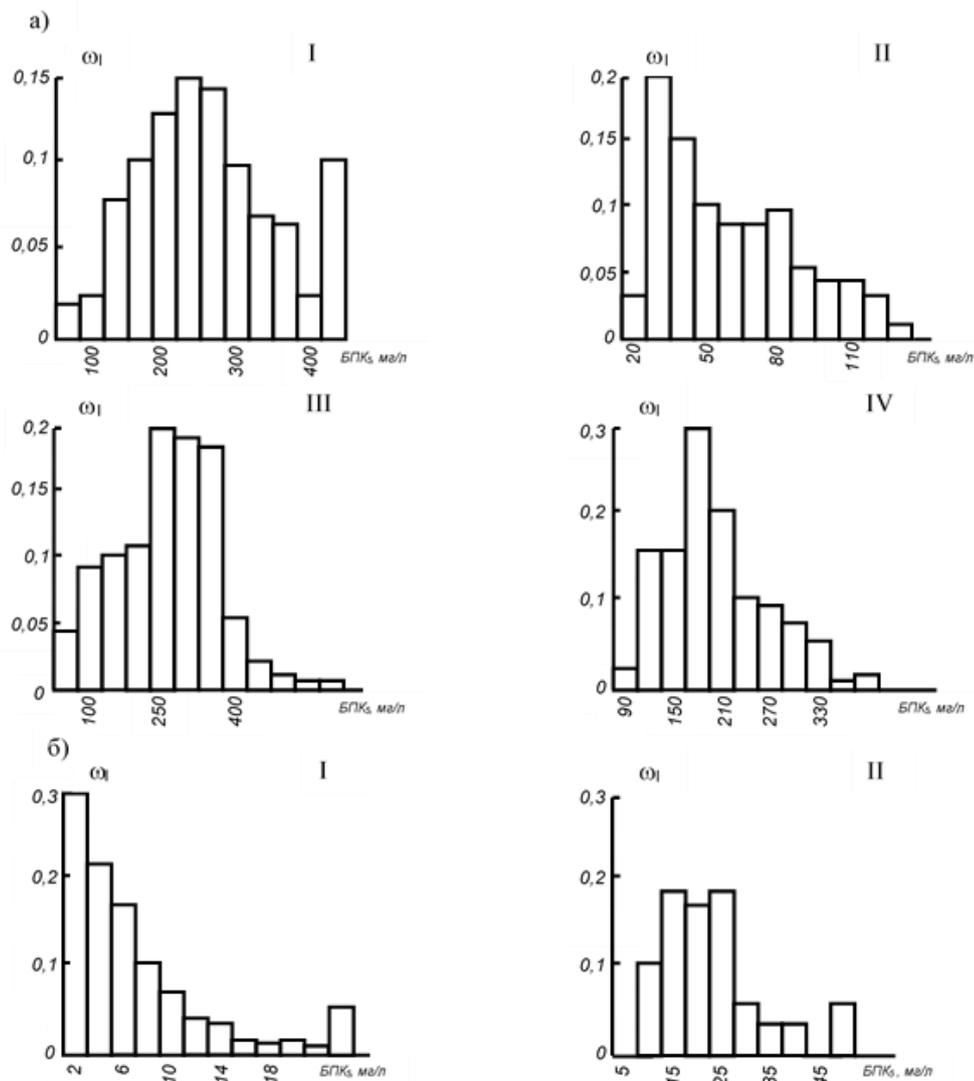


Рис.2.4. Гистограммы распределения среднесуточной БПК₅ в исходной сточной воде станций биохимической очистки, где *a* – поступающей сточной воды, *б* – очищенной воды: *I*– Саларской станции биологической очистки сточных вод; *II*– Карадаринская станция очистки сточных вод; *III* – АО Ферганский химзавод; *IV* – АО «Навоиазот».

Синтез САУ может быть рационально выполнен лишь с учетом свойств неуправляемого объекта. Это приводит к необходимости изучать структурно-функциональные свойства объекта, прежде чем приступать непосредственно к его управлению. Наиболее полно структурно-функциональные свойства объекта могут быть изучены с помощью

математической модели. Можно отметить три основных направления, используемых в математическом моделировании технологических процессов. При аналитическом методе математическая модель строится на основании всестороннего исследования механизма процесса и составляется из уравнений материальных и теплового балансов для каждой фазы процесса, а также из уравнений, отражающих влияние гидродинамических факторов и кинетики реакций для каждого компонента. При этом необходимо учитывать коэффициенты диффузии [81], теплообмена, кинетические константы реакций и т.п. для определения этих коэффициентов требуется комплекс сложных и точных лабораторных и промышленных исследований.

Математическая модель может быть синтезирована также экспериментальными методами. В этом случае, пользуясь методами современной математической статистики, находят формальное математическое описание процесса в условиях, когда теория процесса разработана недостаточно и аналитическое описание его невозможно или затруднено. Это новый кибернетический подход к задаче: исследователь устанавливает функциональные связи между входными и выходными параметрами процесса, абстрагируясь от сложных и плохо изученных явлений, происходящих в процессе. Кроме того, существует третий метод составления математических описаний – экспериментально-аналитический, упрощающий задачу определения численных значений параметров уравнений статики и динамики процесса. В этом случае исходные уравнения составляются на основе анализа процессов, наблюдаемых в объекте, а численные значения параметров этих уравнений определяются по экспериментальным данным, полученным непосредственно на объекте [88].

Ввиду большого разнообразия промышленных сточных вод и технологических схем их обработки экспериментально-аналитический подход к составлению математических описаний значительно облегчает внедрение в практику методов интенсификации и автоматизации процесса биохимической очистки. Кроме того, эти методы наиболее легко используются для корректировки параметров САУ при использовании ЦВМ в контуре управления. Экспериментально-аналитический подход к составлению математического описания процесса биохимической очистки частично освещен в литературе [113].

Как уже указывалось, в настоящее время имеется значительное количество технологических схем процесса биохимической очистки, каждая из которых отличается числом ступеней аэрации, наличием или отсутствием регенерации активного ила, способами ввода в сооружения сточной воды и возвратного ила, направлением потока иловой смеси,

степенью очистки, нагрузками на активный и др. Обязательными элементами почти всех схем являются насосные станции возвратного ила, воздуходувные станции (механические аэраторы) и др [106].

Рассматривая методы управления процессом очистки, следует отметить воздействия, которыми можно воспользоваться для построения САУ:

1) управления расходом возвратного ила с целью поддержания постоянной концентрации активного ила в аэротенке или постоянной органической нагрузки ил;

2) управление расходом воздуха таким образом, чтобы поддержать заданную концентрацию растворенного кислорода во всем аэротенке;

3) управление расходом выводимого из системы активного ила для поддержания возраста ила постоянным.

4) Изменение соотношения объемов аэротенка и регенератора (при сохранении постоянства их суммарного объема) с целью оптимальной регенерации ила;

5) распределение расхода поступающих сточных вод между параллельно работающими аэротенками;

6) поддержание оптимального значения рН воды, поступающей в аэротенк;

7) управление расходом ила, выпускаемого из отстойников, чтобы поддержать в них оптимальной уровень ила и изменять его в зависимости от концентрации и расхода иловой смеси, мутности очищенной отстойной воды, а также илового индекса.

Для выполнения перечисленных задач целесообразно, на наш взгляд, проектировать соответствующее количество локальных САУ для каждого параметра в отдельности или для нескольких вместе, когда нужно поддерживать заданное соотношение между ними. Локальные САУ следует проектировать с таким расчетом, чтобы в дальнейшем иметь возможность автоматически или дистанционно изменять уставки задатчиков регуляторов локальных САУ по данным вычислительного устройства. В вычислительное устройство должна поступать информация о состоянии регулируемых технологических параметров процесса биохимической очистки и о состоянии водоема, принимающего очищенные стоки (рис.2.5).

В настоящее время не представляется возможным осуществить такую САУ из-за отсутствия промышленных средств контроля процесса биохимической очистки. Имеющихся средств для измерения расходов, концентрации растворенного кислорода и уровня ила в отстойниках недостаточно, экспресс-измерители ХПК сточных вод или содержания в них органического углерода в настоящее время еще не нашли

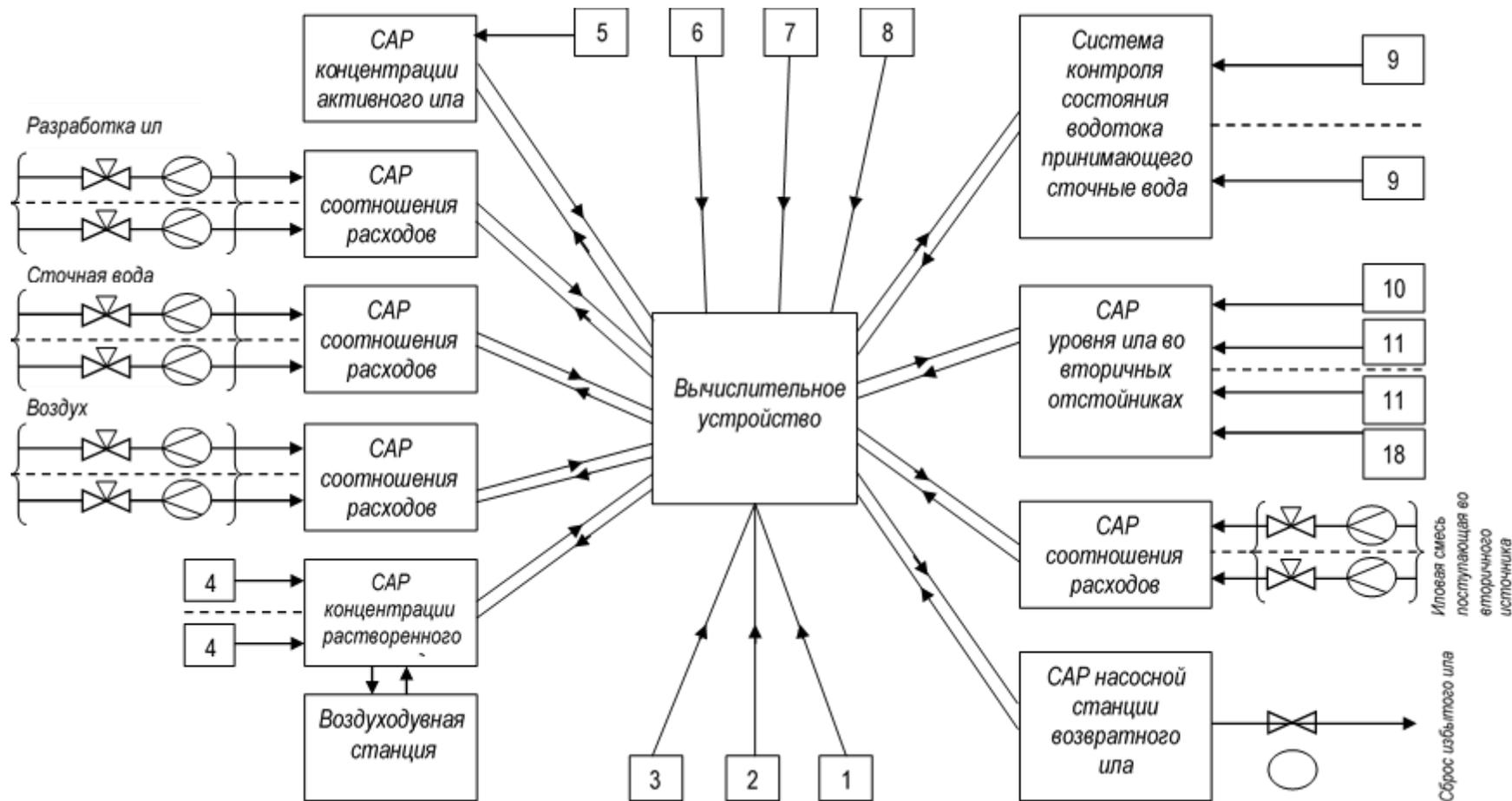


Рис.2.5. Блок-схема процесса биохимической очистки в аэротенке, где 1 – измеритель величины рН на выходе; 2 – то же, на выходе; 3 – измеритель температуры; 4 – датчики концентрации растворенного кислорода; 5 – датчик концентрации активного ила; 6 – датчик скорости потребления кислорода активным илом (проточный респирометр); 7 – датчик концентрации загрязнений.

применения в системах управления. В связи с этим из локальных САР для практической реализации могут быть рекомендованы лишь САР концентрации растворенного кислорода в аэротенках и САР уровня ила во вторичных отстойниках. Целесообразность первых САР вызвана, с одной стороны, необходимостью поддержания во всем объеме аэротенка концентрации растворенного кислорода, превышающей минимально допустимую, с другой стороны, возможностью экономии электроэнергии за счет регулирования воздуходувок. Целесообразность вторых САР вызвана возможностью уменьшения количества взвешенных веществ в очищенной воде и уменьшения затрат электроэнергии за счет перекачки более уплотненного ила [121].

2.5. Оптимальное согласование характеристик аэротенков и вторичных отстойников

Характеристики активного ила в аэротенке, основными из которых являются его концентрация и иловый индекс, оказывают непосредственное воздействие на конструктивно-технологические параметры вторичного отстойника. Еще одним фактором, непосредственно влияющим на работу вторичного отстойника, является степень насыщенности воздухом стока, подаваемого на вход в отстойник: повышенное содержание воздуха стоке инициирует последующую дегазацию потока, вызывающую подъем и вынос осадка с осветленной водой [7].

Высокие концентрации нитратов ($N-NO_3$) в поступающей на осаждение водно-иловой смеси, способствуют развитию процессов денитрификации, в результате которых происходит разложение осевшей и уплотнившейся массы активного ила и вынос части микробной массы с очищенным стоком.

В то же время параметры рециркулируемого в аэротенк возвратного активного ила оказывают непосредственное воздействие на характеристики аэротенка, и в первую очередь на его окислительную мощность, определяющую степень биологической очистки сточных вод [24].

Вторичный отстойник реализует процессы отделения взвешенных веществ, концентрирования и уплотнения микробной массы, удержания ее в сооружении при увеличении гидравлической нагрузки.

Таким образом, параметры функционирования основных элементов технологической схемы системы очистки (аэротенка и вторичного

отстойника) тесно связаны между собой и от их согласования зависит качество очистки стоков в целом.

При проведении настоящей работы испытывались две конфигурации вторичных отстойников, отличающиеся способом подачи стока и его отстаивания:

- горизонтальные отстойники прямоугольной формы с устройством подачи водно-иловой смеси в торце сооружения и отношением «длина/глубина», равном 6, при этом ширина сооружения оставалась постоянной по длине, что благоприятствовало формированию стабильного горизонтального потока;
- радиальные отстойники с подачей водно-иловой смеси в центральную часть и отношением «радиус/глубина», равном 5, обеспечивающие возможность фильтрации смеси через осевший (псевдооживленный) слой активного ила.

Гидравлические потоки сточной воды и активного ила в указанных выше типах отстойников показаны на рис 2.6.

Концентрация активного ила в аэротенке и иловый индекс напрямую влияют на характеристики осаждаемости активного ила, в частности на гидравлическую поверхностную нагрузку (скорость восходящего потока).

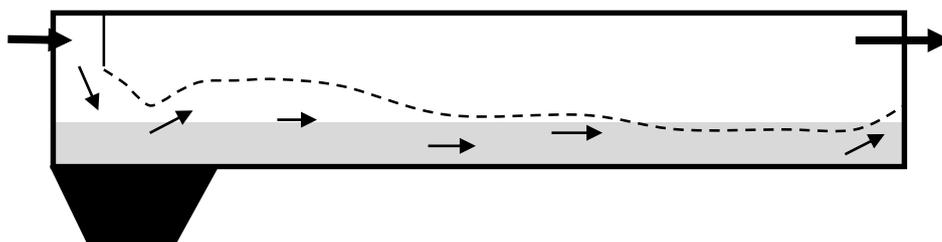
Для горизонтального и рационального отстойников приведены кривые предельной гидравлической нагрузки (скорости восходящего потока) в зависимости от обобщающего параметра – приведенного объемного коэффициента отстойника $K_{пр}$ равного произведению илового индекса на концентрацию ила в поступающей на отстаивание водно-иловой смеси. Аппроксимация полученных экспериментальных данных позволила вывести эмпирические зависимости для определения предельной гидравлической нагрузки (скорости восходящего потока) на отстойники различных типов:

- для горизонтального отстойника

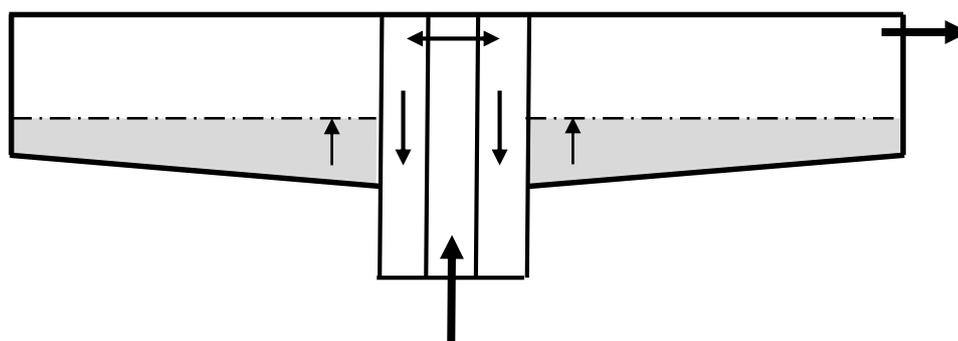
$$q_c \text{ lim} = 2,56 \cdot e^{-0,002K_{пр}} \quad (2.2)$$

- для радиального отстойника

$$q_c \text{ lim} = 1,25 \cdot e^{-0,003K_{пр}} \quad (2.3)$$



а



б

Рисунок 2.6. Схематические потоки в прямоугольном (а) и радиальном (б) вторичных отстойниках

Приведенные эмпирические зависимости могут быть использованы:

- для оптимального согласования режимов работы аэротенков-вторичных отстойников при проектировании сооружений аэробной биологической очистки;
- для прогнозирования эффективности работы вторичных отстойников по параметрам активного ила в аэротенке при эксплуатации действующих очистных сооружений.

В табл. 2.5 показано влияние концентрации и илового индекса активного ила в аэротенке на предельную гидравлическую нагрузку (скорость восходящего потока) во вторичном отстойнике.

Таблица 2.5.

Концентрация активного ила в аэротенке, г/л	Иловый индекс мл/г	Приведенный объемный коэффициент отстойника, мл/л	Предельная гидравлическая нагрузка, м ³ /м ² ·ч
3,0	150	450	1,05
4,5		675	0,6
6,0		900	0,4

Видно, что снижение концентрации активного ила в аэротенке позволяет отстойнику функционировать с предельной гидравлической нагрузкой (скоростью восходящего потока) и таким образом избежать потери (вынос) активного ила с осветленной водой [25].

Зависимость илового индекса (мл/г) от типа обработки сточной воды в аэротенке приведена в табл. 2.6.

Таблица 2.6.

Углерод				Азот	Фосфор	
Продленная аэрация	Низкая нагрузка	Средняя нагрузка	Высокая нагрузка	Нитрификация/ денитрификация	Физико-химическая обработка	Комбинированная обработка
150		100	70	150	110	

Важной характеристикой функционирования отстойников является также потребная глубина зоны накопления биомассы активного ила, от величины которой зависит располагаемая объемная мощность сооружений. По результатам проведенной работы этот конструктивный параметр отстойника также связан с параметрами работы аэротенка и может рассчитываться по следующей эмпирической зависимости [46]:

$$h = \Delta C \cdot V_{BA} \cdot \frac{I}{1000 \cdot S} \quad (2.4)$$

где ΔC – снижение концентрации активного ила в аэротенке (от концентрации в рециркулируемом иле);

V_{BA} – объем аэротенка;

I – иловый индекс активного ила в аэротенке;

S – поверхность отстаивания.

Отношение V_{BA}/S для очистных сооружений с продленной аэрацией составляло около 10, поэтому глубина зоны накопления биомассы активного ила в отстойнике при иловом индексе $I = 150$ мл/г в условиях испытаний равнялась около 1,5 м.

Большая глубина зоны накопления осадка позволяет накапливать активный ил в моменты высоких гидравлических нагрузок, продолжительность которых влияет на величину поверхности отстаивания. При увеличении гидравлических нагрузок имеет место снижение концентрации активного ила в аэротенке и увеличение восходящей скорости в отстойнике, что позволяет уменьшить объем отстойника (рис 2.7, 2.8).

Большое влияние концентрацию активного ила в аэротенке и иловый индекс, а значит и на параметры отстаивания, имеет степень рециркуляции активного ила в аэротенк. Повышенная степень рециркуляции приводит к низким значениям концентрации возвратного

ила, а это не позволяет поднять уровень концентрации ила в аэротенке больше некоторого максимального значения [66].

Максимально возможная концентрация рециркулируемого активного ила связана обратно пропорциональной зависимостью с иловым индексом и определяется эмпирическими зависимостями:

$$\begin{aligned} \text{при } I < 200 \text{ мл/г} & \quad C_{r \max} = 1000/I \\ \text{при } I > 200 \text{ мл/г} & \quad C_{r \max} = 1200/I \end{aligned}$$

Степень рециркуляции определяет не только концентрацию активного ила и иловый индекс в аэротенке, но и время пребывания активного ила во вторичном отстойнике. Поэтому степень рециркуляции необходимо также ограничивать, чтобы избежать вспухания, анаэробноза или денитрификации, т.е. срыва функционирования вторичного отстойника вследствие всплывания крупных фрагментов уплотненных масс активного ила. В случае, когда концентрации нитратов ($N - NO_3$) составляют более 8 мг/л на выходе из аэротенка, процесс денитрификации в массе осевшего активного ила не продуцируется и выноса осадка с осветленной водой не происходит.

Реализуемая на практике величина степени рециркуляции зависит от времени года: около 150 % в сухой период и 100 % в дождливый период.

При гидродинамическом равновесии системы степень рециркуляции (t) определяет фактор сгущения (f_{ep}) которой является показателем качества активного ила:

$$f_{ep} = 1 + \frac{1}{t} \quad (2.5)$$

где фактор сгущения $f_{ep} = 2$ при $t = 1,0$ (100 % рециркуляции),
фактор сгущения $f_{ep} = 1,67$ при $t = 1,5$ (150 % рециркуляции).

Между степенью рециркуляции и глубиной зоны отстаивания также существует вполне определенная взаимосвязь: отсутствие объема для накопления активного ила приводит к необходимости интенсивной рециркуляции, которая позволяет направить по кругу ил, поступивший из аэротенка. Однако при высокой степени рециркуляции имеется риск деградации качества активного ила [85].

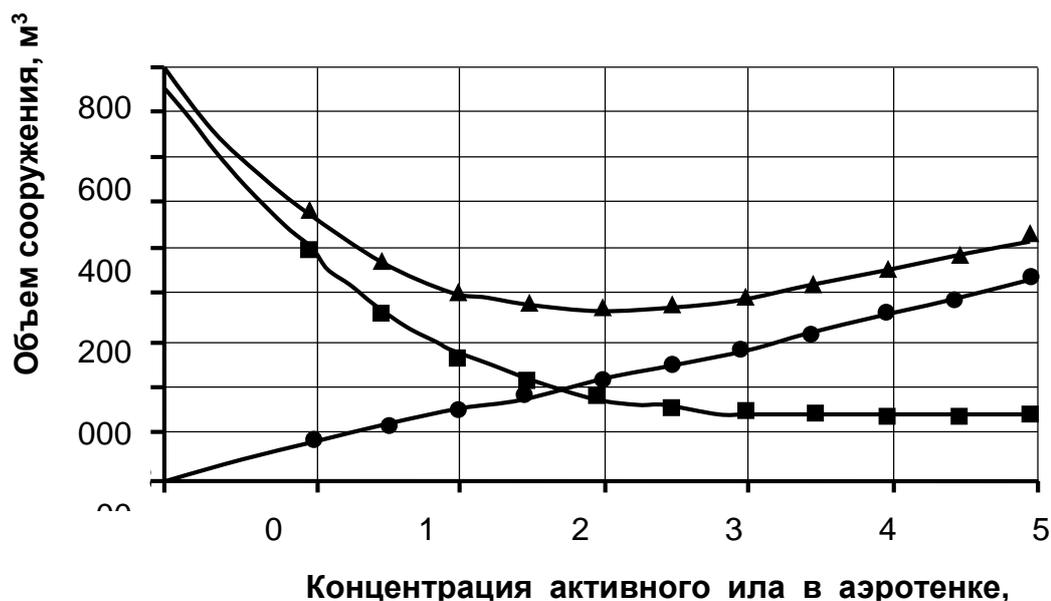


Рис. 2.7. Объемы аэротенка и вторичного отстойника и общий объем сооружений (аэротенк + вторичный отстойник) в процессах с высокой нагрузкой.

- Аэротенк: $V_{BA} = -14,468a_i^2 + 203,33a_i^2 - 963,81a_i^2 + 1756,1$; $R^2=0,99$
- Вторичный отстойник: $V_C = 122,18a_i + 24,182$; $R^2=0,99$
- ▲ Аэротенк + II отстойник: $V_T = -13,271a_i^3 + 194,97a_i^2 - 832,35a_i + 1788,5$; $R^2=0,98$.

Параметры, характеризующие состояние активного ила в аэротенке (концентрация ила и иловый индекс), зависят от размеров вторичного отстойника. Концентрация активного ила на входе в отстойник в основном зависит от объемов аэротенка и величины нагрузки по загрязнению га активный ил. Увеличение концентрации активного ила в аэротенке при любых нагрузка безусловно приводит к уменьшению его объема. Потребный объем вторичного отстойника при этом увеличивается, но в разной степени:

- интенсивно – при высоких нагрузках;
- слабо – при низких нагрузках.

В результате потребный общий объем сооружений (аэротенк + отстойник) в зависимости от концентрации активного ила в аэротенке изменяется по-разному:

- при высоких нагрузках общий объем имеет минимальное значение при концентрации ила около 3 г/л;
- при низких нагрузках общий объем непрерывно уменьшается по мере увеличения концентрации ила (до проверенных концентраций, равных 6 г/л).



Рис. 2.8. Объемы аэротенка и вторичного отстойника и общий объем сооружений (аэротенк + вторичный отстойник) в процессах с высокой нагрузкой.

- ▲ Аэротенк: $V_{BA} = 13,395a_i^3 + 189,84a_i^2 - 910,96a_i + 1699,7,1$;
 $R^2 = 0,99$
- Вторичный отстойник: $V_C = 123a_i$
- Аэротенк + II отстойник: $V_T = -13,451a_i^3 + 190,38a_i^2 - 890,49a_i + 1689,9$; $R^2 = 0,99$

По результатам испытаний максимальная концентрация активного ила в аэротенках, реализующих различные технологические режимы, имела следующие значения:

- при продленной аэрации – 4,5 г/л
- при низкой нагрузке – 4,0 г/л;
- при средней нагрузке – 3,0 г/л;
- при высокой нагрузке – 2,0 г/л.

Таким образом, оптимизация работы биологической системы аэротенк-вторичный отстойник требует строго учета характера взаимозависимостей между технологическими параметрами этих основных конструктивных элементов как при проектировании, так и при модернизации очистных сооружений [89].

2.6. Значения амплитудно-частотных колебаний параметров сточных вод на выходе из очистных сооружений

Нагрузки по загрязнению, приходящие со сточными водами на очистные сооружения, в значительной степени подвержены колебаниям,

связанным с различного рода внешними факторами. В связи с этим при проектировании очистных сооружений необходимо закладывать определенные «запасы прочности», которые обеспечивали бы надежную и устойчивую работу при всех возможных отклонениях нагрузок от номинальных в процессе эксплуатации. В качестве таких запасов прочности на практике используется увеличение объемом сооружений в 1,3-2,5 раза по сравнению с их расчетными значениями.

При проведении работы анализу были подвергнуты три типа аэрационных бассейнов [58]:

- с поршневым потоком;
- с диспергированным потоком (промежуточный тип);
- с потоком полного смешения.

Дифференциальные уравнения, описывающие указанные типы бассейнов имеют вид:

- для бассейна с поршневым потоком

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + U \frac{\partial Y}{\partial L} + K \cdot L = 0 \quad (2.6)$$

- для бассейна с диспергированным потоком

$$\frac{\partial Y}{\partial t} - D_L \frac{\partial^2 Y}{\partial L^2} + U \frac{\partial Y}{\partial L} + K \cdot L = 0 \quad (2.7)$$

- для бассейна с потоком полного смешения

$$\frac{\partial Y}{\partial t} V - Q \cdot Y + K \cdot L = Q \cdot X \quad (2.8)$$

где Y – концентрация загрязнений на выходе;

X – концентрация загрязнений на входе;

U – скорость потока сточной воды;

D_L – коэффициент дисперсии;

L – длина бассейна;

K – коэффициент разложения питательных вещества;

Q – расход сточной воды;

V – объем сооружения;

T – время.

Зависимость коэффициента прироста амплитуды от частоты колебаний для трех указанных видов бассейнов показана на рис. 2.9.

На этой диаграмме видны два диапазона частот: низкочастотный, где уменьшение амплитуды объясняется только дисперсией, и высокочастотный, где частота колебаний уменьшается главным образом из-за объемного смешивания.

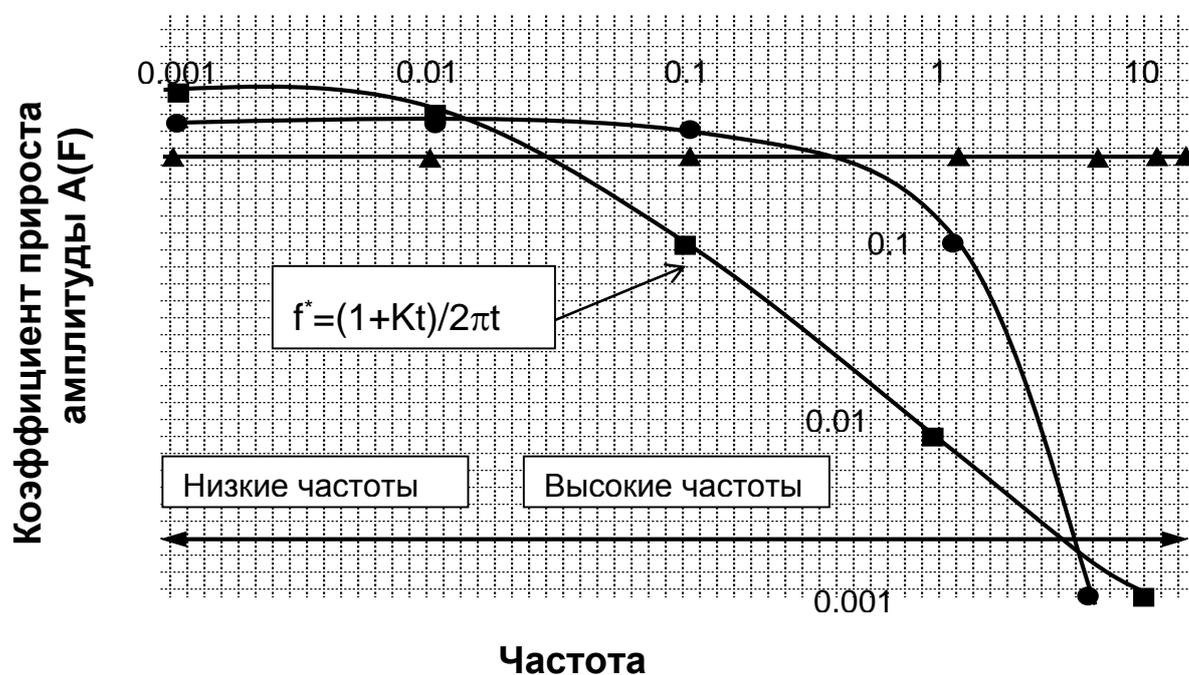
Поскольку системы, описанные уравнениями (2.6)-(2.8) являются линейными, то возможно применить принцип суперпозиций, т.е. компоненты сигнала сточных вод на входе разделить на основные характеристики и рассматривать их отдельно, а общий выход считать, как сумму отдельных сигналов.

Характеристический анализ показал, что изменения нагрузок на входе в систему носят:

- кратковременный (случайный) характер;
- периодический (длительный характер – сезонный, еженедельный, ежесуточный).

Для характеристики колебаний нагрузок на входе могут быть использованы вероятностно-статистические параметры:

- средние значения параметров;
- среднеквадратичные отклонения параметров (дисперсии);
- энергетический спектр по определению представляет собой преобразование Фурье автоковариационной функции и обладает рядом важных свойств.



- ▲ Поток идеального вытеснения
- Поток идеального вытеснения
- Поток идеального смешения

Рис. 2.9. Диаграммы систем обработки сточных вод.

Энергетический спектр показывает, как дисперсия зависит от частоты, т.е.

$$S^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(f) df \quad (2.9)$$

где S^2 – дисперсия сигнала;
 f – энергетический спектр.

На практике взятие образцов проб – всегда дискретный процесс в

определенных интервалах отбора. В этом случае энергетический спектр ограничивается максимальной частотой, которую можно определить из записей дневника испытаний. Эта частота равна $f_c = 1/2 (\Delta t)$, где (Δt) – интервал отбора проб.

Тогда

$$S^2 = \int_0^{f_e} C(f) df \quad (2.10)$$

где $C(f)$ – оценка энергетического спектра.

На рис. 2.10 характерные изменения концентрации сточных вод, поступающих на городские очистные сооружения, на рис. 2.11. – их энергетические спектры. Видно, что большая часть колебаний (почти 85 % всех колебаний воды на входе) происходит с частотой 1/24 ч. Остальные колебания носят случайный характер.

Зависимость между энергетическими спектрами входа и выхода может быть выражена уравнением

$$\frac{C_y(f)}{C_x(f)} = \frac{\Gamma_y(f)}{\Gamma_x(f)} = [A(f)]^2 \quad (2.11)$$

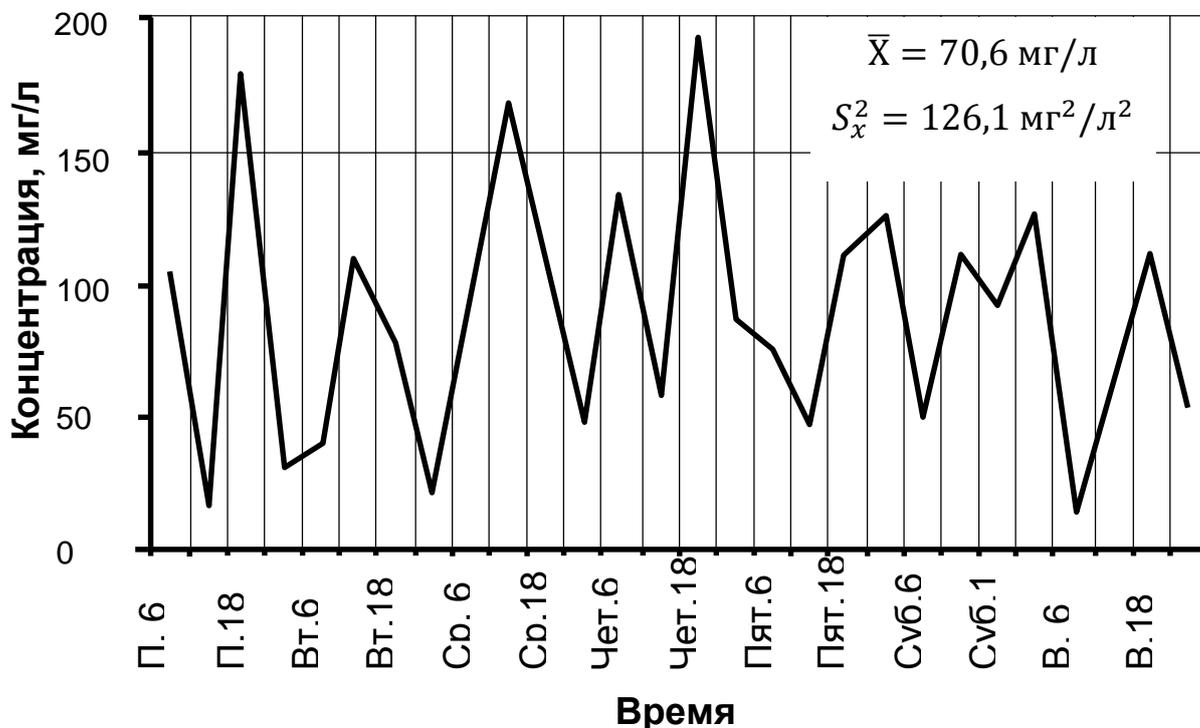


Рис. 2.10. Концентрация загрязнений в зависимости от времени суток.

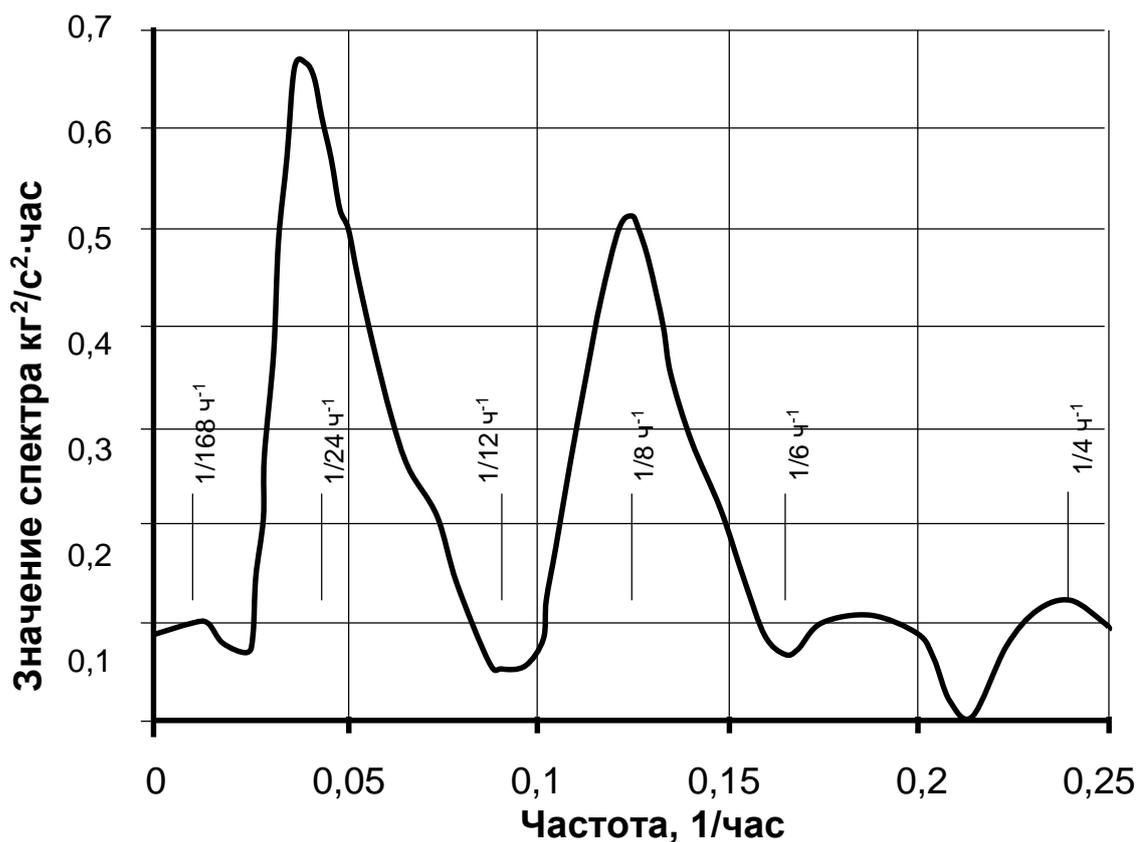


Рис. 2.11. Спектр поступающей воды.

Объединяя уравнения (3.5) и (3.6), получим дисперсию воды на выходе в виде

$$S_Y^2 = \int_0^{f_c} [A(f)]^2 C_x(f) df \quad (2.12)$$

Числовое и графическое решение этого уравнения возможно для любой системы и любых колебаний воды на входе в том случае, когда известен энергетический спектр воды на входе в систему.

Упрощенные формулы для чисто случайных отклонений на входе («белый шум»), когда для всех частот колебаний энергетический спектр является величиной постоянной, имеют вид:

- один резервуар полного смешения

$$\frac{S_Y^2}{S_X^2} \approx \frac{1}{1+Kt} \cdot \frac{\Delta t}{2t} \quad (2.13)$$

- два последовательных резервуара полного смешения

$$\frac{S_Y^2}{S_X^2} \approx \frac{\Delta t}{2(1+Kt_2)[t_1(1+Kt_2)+t_2]} \quad (2.14)$$

- резервуар с дисперсионным потоком

$$\frac{S_y^2}{S_x^2} = 0,26 \cdot 10^{-0.82k} \cdot Pe^{0.45} \cdot \frac{\Delta t}{t} \quad (2.15)$$

- резервуар с поршневым потоком (амплитуда не зависит от частоты)

$$\frac{S_y^2}{S_x^2} = e^{-2k} \quad (2.16)$$

Используя полученные математические зависимости можно произвести следующие вычисления:

- определить необходимое (заданное) время пребывания по средней нагрузке по БПК и умножить его на «запас прочности», равный 2;
- определить необходимое (заданное) время пребывания по максимальной нагрузке и проверить его для средних условий.

Расчетный процесс завершается в два этапа:

- определение размеров аэрационных сооружений, используя средние нагрузки на входе и выходе;
- определение дополнительного объема аэрационных сооружений для буферизации колебаний нагрузки на входе (снятия колебаний исходных сточных вод по нагрузке).

2.7. Экспериментальные методы изучения объектов биологической очистки сточных вод

С достаточной отражающих изменение коэффициента самовыравнивания во всем диапазоне возможных изменений величины рН, титрование кислоты или щелочи следует производить тем реагентом, который используется для обработки сточных вод.

Другим важным фактором, предопределяющим структуру САР, является время переходного процесса реакции в условиях, близких к оптимальным, т. е. динамическая характеристика процесса. Методика ее получения также несложна. Проба сточной воды при интенсивном перемешивании подвергается воздействию дозы реагента, рассчитанной на проведение исследуемой реакции до заданного уровня. Кривая переходного процесса во времени, выраженная в единицах рН или

электропроводности, служит динамической характеристикой процесса [81].

В основу расчета устойчивости САР положены динамические характеристики объекта регулирования. Наиболее наглядное представление о переходном процессе в объекте дают кривые разгона—временные характеристики, получающиеся в результате ступенчатого возмущения по основному каналу.

На рисунке 2.12 приведена кривая разгона одного из распространенных на очистных сооружениях объектов регулирования – ершового смесителя, в котором происходит нейтрализация содержащихся в сточной воде кислот известковым молоком. Параметром регулирования σ служит величина рН, измеренная на выходе из смесителя и преобразованная в напряжение $U_{вх}$ на входе в регулятор; возмущающим воздействием λ_0 – изменение расхода реагента. Расход сточной воды и ее химический состав неизменны.

Из графика определяются время запаздывания τ и постоянная объекта T_0 . Запаздывание τ есть сумма транспортного τ_T и переходного τ_P запаздывания. Тангенс угла наклона касательной к кривой в точке перегиба, определенный для единичного возмущения, характеризует скорость разгона

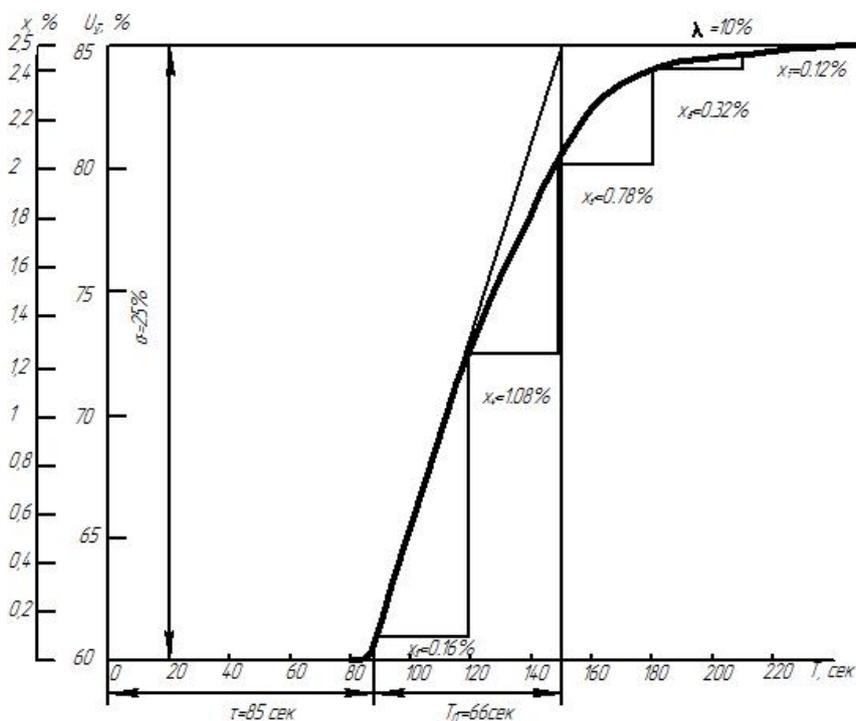


Рис. 2.12. Временная характеристика ершового смесителя

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{уст}}{T_0 \lambda_0} \quad (2.7)$$

Методика получения кривых разгона ясна из их определения.

Резкое проявление возмущений, влияющих на свойства объекта, может потребовать настолько существенного усложнения САР, что ее применение станет нецелесообразным с экономической и эксплуатационной точки зрения. Поэтому следует устранять наиболее вредные возмущающие воздействия в первую очередь совершенствованием технологии очистки и улучшением организации сбора сточных вод.

Возмущения по основному каналу (концентрация нейтрализуемого компонента) могут отличаться амплитудой и частотой колебаний. Пиковые значения концентраций часто в десятки раз превышают средние данные, на основе которых проектируется оборудование станции. Поэтому предельные значения амплитуды входных колебаний должны служить важнейшим фактором при выборе производительности реагентных узлов и пропускной способности регулирующий арматуры.

При оценке влияния на работу САР частоты внешних возмущений следует сопоставлять период колебаний возмущающего фактора со временем регулирования системы, т. е. с продолжительностью отработки регулятором очередного возмущения. Ориентировочно время регулирования непрерывных САР приведено в табл. 2.7.

Таблица 2.7.

Переходный процесс	Время регулирования, при		
	П - регу- лировании	ПИ - регу- лировании	ПИД - регу- лировании
Апериодический	4τ	8τ	5τ
20 %-ное перерегулирование	5τ	12τ	6τ
$\min \int x^2 dt$	8τ	16τ	9τ

Для сооружений очистки промышленных стоков характерны возмущения, проявляющиеся в виде пикового отклонения концентрации на входе с последующим медленным ее изменением до новой величины. Применение в этих условиях ПИ – регулирования может привести к длительному отклонению параметра от заданного значения, вызванному совпадением скоростей входного изменения и перемещения регулирующего органа в астатическом режиме работы регулятора. Решение задачи в данном случае следует искать в выборе соответствующих динамических настроек регулятора, применении ПИД –

регулирования или в усложнении структуры САР.

Сточные воды ряда производств (органического синтеза, пластмасс, хлорорганических продуктов, биохимических реактивов и т. п.) содержат в своем составе смеси слабых и сильных кислот, оснований и их солей. Такие сточные воды обладают буферными свойствами, зависящими, как известно, от соотношения концентраций компонентов, определяющих эти свойства. Однако соотношение концентраций указанных компонентов в производственных сточных водах изменяется во времени. По этой причине кривая потенциометрического титрования (статическая характеристика регулируемого процесса) все время меняет свою форму, а это означает, что коэффициент буферности σ (тангенс угла наклона касательных потенциометрической кривой) изменяется еще в большей степени, чем обычно.

Коэффициент буферности определяется отношением, $\sigma = \Delta pH / \Delta \varphi$ (где $\Delta \varphi$ – изменение количества реагента в миллиэквивалентах на 1 л раствора).

На рисунке 2.13 приведены кривые титрования 5%-ной известковой суспензии сточных вод от аэропортов Ташкент 1-2-3, загрязненных смесью минеральных и органических кислот, содержащихся в постоянно изменяющемся соотношении и обладающих отчетливо выраженными буферными свойствами: минимальными (кривая 1), средними (кривая 2) и максимальными (кривая 3). При $pH=4 \div 10$ коэффициент буферности, по данным рисунка 2.13, изменяется в 24 раза.

Коэффициент буферности является главной составной частью одной из основных характеристик регулируемого процесса и всего объекта регулирования — коэффициента усиления. Другие факторы, влияющие на величину коэффициента усиления объекта, — колебания расхода сточных вод и концентрации реагента — не подвергаются более чем 3—5-кратному изменению. В целом же вариации коэффициента усиления рассматриваемых объектов могут достигать 100-кратной величины.

Расчеты настроечных параметров САР процесса нейтрализации показывают, что для получения устойчивого и качественного регулирования коэффициент усиления регулятора должен изменяться примерно в таких же пределах, причем изменяться автоматически без перерыва в процессе регулирования.

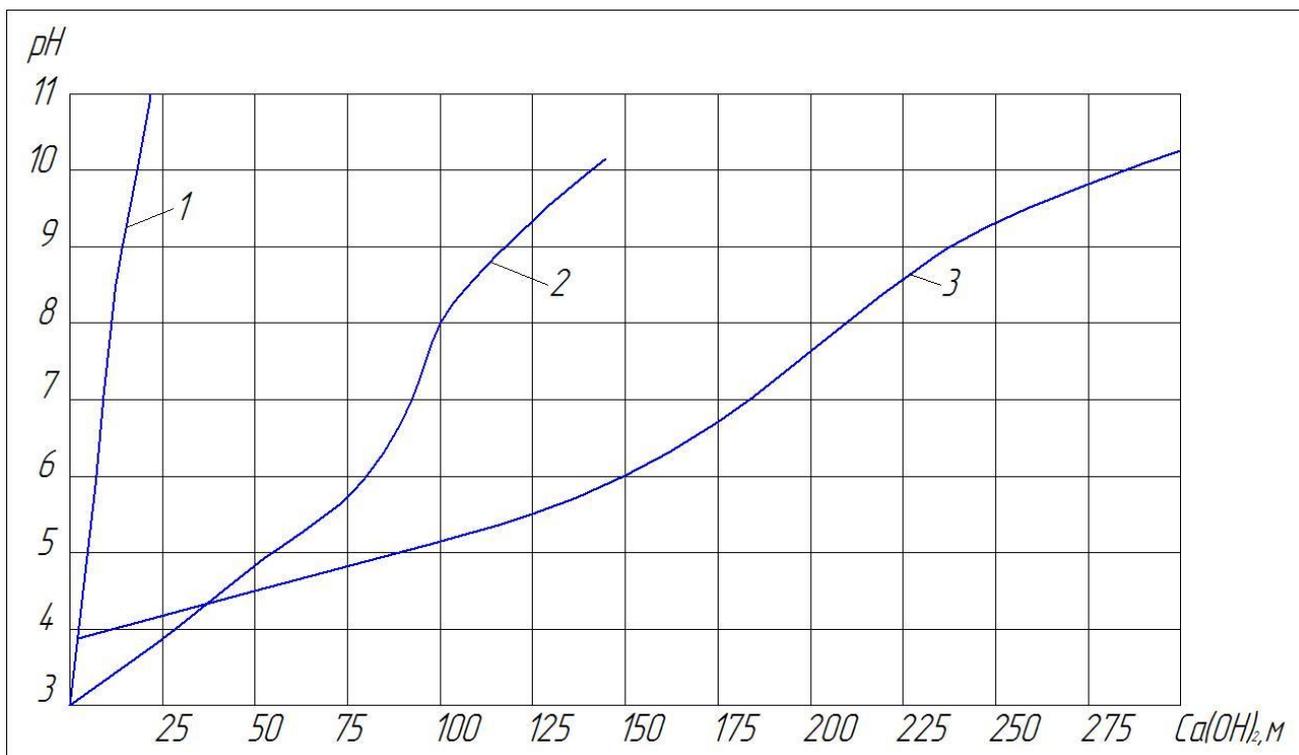


Рис. 2.13. Кривые титрования сточных вод, поступающих от аэропортов Ташкент 1-2-3 на Саларскую станцию аэрации.

- 1 - проба воды со слабо выраженными буферными свойствами;
 2 - то же, со средней буферностью;
 3 - то же, с сильно выраженными буферными свойствами.

2.8. Метрологические вопросы выбора и применения рН-метров и иономеров

рН-метр и иономер используют один принцип измерения - потенциометрический, т.е. эти приборы измеряют электродвижущую силу (ЭДС) создаваемую электрохимической ячейкой, состоящей с измерительного электрода, электрода сравнения и водного раствора [83].

В рН-метре, в качестве измерительного электрода, используют стеклянный рН-электрод, который селективный к ионам водорода.

В иономере используют электроды селективные к другим ионам, а также рН-электрод. Например, селективные к NO_3^- , K^+ , Na^+ и др.

В качестве электрода сравнения в обоих приборах применяют хлорсеребряный электрод.

Таким образом, различия между этими приборами сводятся только к типу используемого измерительного электрода и некоторым дополнительным функциям, которые присущи иономерам и о которых речь пойдет дальше [70].

Принцип измерения рН в промышленном и лабораторном рН-метра одинаков. Но существенно отличаются условия эксплуатации приборов и, следовательно, выдвигаемые требования - к промышленным приборам требования значительно жестче, чем к лабораторным. Требования стандартов ГСП определяют устойчивость прибора к механическим, климатическим, электромагнитным и другим воздействиям на прибор, надежность прибора, обязывают рН-метр формировать электрические сигналы для информативной связи с другими промышленными приборами. Современные промышленные рН-метры, также, должны формировать цифровые сигналы и использовать протоколы обмена между промышленными приборами, которые широко распространены на Западе, при построении автоматизированных систем промышленных приборов [74].

С другой стороны, промышленный рН-метр в качестве электрохимической ячейки использует датчик рН, а лабораторный рН-метр работает с рН-электродами, которые, для датчика рН являются одной из составных частей. В этом заключается еще одно отличие между промышленным и лабораторным рН-метром [72].

рХ имеет тоже самое определение, но применительно к другим ионам. Иными словами, это логарифмические показатели активной концентрации ионов водорода (рН), нитратов (рNO₃), калия (рК) и т. д. в водном растворе.

рН (рХ) не являются физическими величинами, хотя при их определении выполняют измерения таких физических величин как ЭДС, температура, а результаты измерений представляют или в значениях рН (рХ) (безразмерные величины) или в единицах концентрации или массовой доли определенного иона, когда оценивают содержание веществ по показаниям рХ.

Состав и значения точек шкалы рН, в диапазоне температур от 0 до 95 °С, определяет ГОСТ 8.134 "Шкала рН". В соответствии с этим стандартом, имеются шестнадцать растворов известного состава, которые называются буферные растворы рН (БР).

Эталонами рХ служат Государственные стандартные образцы состава ионов или аттестованные растворы солей, называемые еще растворами сравнения.

Эталон рН делится на разряды в зависимости от точности эталона. Так эталон рН 2-го разряда имеет погрешность рН равную ±0,01.

Буферные растворы обычно готовят из стандарт-титров и аттестуют их по методике приготовления. В процессе приготовления эталона из стандарт-титров можно допустить ошибку и тогда буферный раствор будет иметь погрешность, большую, чем нормируемая погрешность БР.

При ответственных измерениях всегда нужно пользоваться БР, приготовленными уполномоченными на этот вид деятельности организациями.

Погрешность рХ аттестованных растворов зависит также от методики приготовления.

Измерения рН (рХ) относятся к косвенным измерениям, т.е. к такому виду измерений, когда результат определяется не прямо как, например, длина, а в результате измерения других физических величин, таких как ЭДС, температура и последующих расчетов. Значение ЭДС, которую формирует электрохимическая ячейка, зависит от температуры раствора и меняется во времени в результате изменения параметров измерительного электрода (значение ЭДС, кроме того, является также функцией концентрации ионов). Чтобы отслеживать изменение параметров электродов, необходимо периодически выполнять процедуру, которая называется *градуировка прибора*. Во время этой процедуры, которую никакой прибор не может обойти, устанавливается однозначная зависимость между значениями рН буферных растворов или значениями рХ растворов сравнения и показаниями прибора.

Для этого достаточно произвести измерение ЭДС электрохимической ячейки с буферным раствором (для рН), в котором нормируется значение ЭДС, а также рассчитать крутизну характеристики измерительного электрода S (лучше, если это делает прибор) и сравнить эти значения с паспортными данными на измерительный электрод.

При измерении рН (рХ) необходимо учесть, что результат измерения всегда будет зависеть от изменения температуры раствора, так как в результате измерений появляются две добавки (со знаками \pm): одна связана с изменением активности раствора, и мы на нее повлиять не можем, а вторая, которая может практически отсутствовать, связана с изменением параметров электродов электрохимической ячейки.

В приборах с рН-электродом (рН-метр) возможно, из-за наличия так называемой координаты изопотенциальной точки - $E_{и}$, $pH_{и}$, скомпенсировать температурные изменения параметров электрода. Значение координаты изопотенциальной точки приведены производителем электродов на корпусе рН-электрода. Но эти значения средние для каждого типа рН-электродов (вспомните о средней температуре по палате), и их нельзя использовать для температурной компенсации, при работе в широком диапазоне температур, какие характерны для промышленных рН-метров.

Выход из этого положения:

- определить *действительные* значения координаты изопотенциальной точки электрода в процессе градуировки прибора;

-если прибор не имеет такой функции, определить координаты изопотенциальной точки электрода в центрах метрологии с тем, чтобы их задать прибору;

- измерения выполнять в растворах, рН которых близко к значению рН_и.

Оценим среднеквадратичное отклонение (СКО) результата измерения рН, вызванное неопределенностью положения изопотенциальной точки на электродной характеристике, при измерениях в пробе, температура которой на 20 °С больше температуры, при которой производилась градуировка. Для этой оценки используем рН-электрод с номинальным значением координаты изопотенциальной точки рН_и = 6,7 ± 0,3; E_и = 0,7 мВ (значение E_и определено в процессе градуировки), температура пробы 40 °С. ЭДС электрода, в БР с рН = 1,65, E = 330 мВ, крутизна электродной характеристики рН-электрода при данной температуре S₄₀ = -(61,80±0,24) мВ/рН.

Погрешность крутизны электродной характеристики определяется неопределенностью значения координаты изопотенциальной точки. Температура, при которой производилась градуировка прибора 20 °С. Расчет СКО выполним по формуле (2.18):

$$S = \sqrt{\frac{(E-E_u)^2 \cdot \Delta S^2}{S^4}} = \sqrt{\frac{(330-0,7)^2 \cdot 0,24^2}{61,8^4}} = 0,02 \quad (2.18)$$

В приборах с ионоселективными электродами (иономер), из-за отсутствия изопотенциальной точки в ионоселективных электродах, полностью скомпенсировать изменения параметров электродов от изменения температуры достаточно сложно.

Оценим среднеквадратическое отклонение результата измерений рН S_T, связанное с погрешностью измерения температуры в буферном растворе с номинальным значением рН = 1,65 по формуле (2.19). Действительное значение температуры БР t = 25 °С. Погрешность прибора при измерении температуры ΔT = ± 1 °С. рН-электрод с координатой изопотенциальной точки: рН_и = 6,7, E_и = 18 мВ. Значение ЭДС в буферном растворе E = 317 мВ.

$$S_T = \sqrt{\frac{(E-E_u)^2 \cdot \Delta T^2 / 3}{0,198^2 \cdot (273,15+t)^4}} = \sqrt{\frac{(317-18)^2 \cdot 1^2 / 3}{0,198^2 \cdot (273,15+25)^4}} = 0,01 \quad (2.19)$$

Таким образом, погрешность измерения температуры вносит вклад в точность измерения рН.

Основные составляющие погрешности прибора:

1) погрешности измерения ЭДС, температуры, термокомпенсации и

погрешности от влияющих величин;

2) погрешность градуировки, в которую входит погрешность БР вместе с погрешностью прибора;

3) случайная составляющая погрешности измерений.

2.8.1. Определение значения и погрешности рН

По Соренсену [72], pH определяется как отрицательный десятичный логарифм концентрации иона H_3O^+ :

$$pH = -\log_{10}[H_3O^+] \quad (2.20)$$

Из уравнения можно видеть, что, если концентрация ионов H_3O^+ изменяется в десять раз, значение pH меняется на единицу. Это показывает, как важно уметь замерять даже малые изменения в pH значении образца.

Часто pH теория описывается с H^+ - ионами в определении pH , хотя правильнее указывать в уравнении именно гидроксоний-ион (официальное название по IUPAC - оксоний-ион), H_3O^+ :



Не только кислоты и основания могут диссоциировать с образованием ионов гидроксония или гидроксид-ионов, но и чистая вода также может диссоциировать с образованием ионов гидроксония или гидроксид-ионов:



Константа диссоциации для такого поведения называется K_w , другое её название - константа автоионизации (автодиссоциации) воды:

$$K_w = \frac{[H_3O^+][OH^-]}{[H_2O]} = [H_3O^+][OH^-] = 10^{-14} \text{ моль/л (25 °C)} \quad (2.23)$$

Из уравнения K_w можно видеть, что, когда в растворе присутствуют равные количества H_3O^+ и OH^- , раствор нейтрален; в этом случае и $[H_3O^+]$, и $[OH^-]$ равны 10^{-7} моль/л, т.е. $pH = 7$. Когда имеется большая концентрация H_3O^+ , тогда значение pH сдвигается в кислотный конец шкалы; например, концентрация H_3O^+ в 10^{-3} моль/л (тогда,

следовательно, $[OH^-] = 10^{-11}$ моль/л) даёт значение $pH = 3$.

Чтобы измерить это значение в растворе образца, нам нужно знать, как pH -сенсоры реагируют на концентрацию кислоты в растворе.

Во многих условиях использование концентрации - очень хорошее приближение к использованию активности.

Активность иона водорода (a_{H^+}) описывается концентрацией ионов водорода и коэффициентом активности (γ_{H^+}). Концентрация в этом случае обычно даётся как моляльность ($b =$ моль/кг растворителя), а не молярность ($c =$ моль/л раствора), поскольку молярность – менее двусмысленный термин.

Активность в таком случае определяется по формуле:

$$a_{H^+} = \gamma_{H^+} \cdot b_{H^+} \quad (2.24)$$

в разбавленных растворах можно использовать приближение

$$a_{H^+} = b_{H^+} \quad (2.25)$$

Константа активности не является универсальной постоянной; значение этого числа снова зависит от таких разнообразных факторов, как температура (T), общая ионная сила (I), диэлектрическая постоянная, заряд иона (z), размер ионов (в ангстремах) и плотность (d) среды.

Существуют два главных эффекта при проведении различий между активностью и концентрацией ионов. Это так называемый солевой эффект и эффект среды.

Влияние солей, присутствующих в растворе, значение pH которого измеряется, называется солевым эффектом. Этот солевой эффект обозначается символом $\gamma_{H^+}^x$ и описывается как

$$\log_{10} \gamma_{H^+}^x = \frac{0,5\sqrt{I}}{1+3\sqrt{I}} \quad (2.26)$$

В этом уравнении I - символ общей ионной силы раствора $\frac{1}{2} \sum c_i z_i^2$.

Если допустить в случае измерения pH , что и анион, и ион водорода моновалентны, z_i будет равен 1, а общая ионная сила I будет определяться моляльностью. Влияние солевого эффекта на коэффициент активности концентраций отдельных ионов показано в следующей таблице 2.8.

Таблица 2.8.

Моляльность	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1
Коэффициент активности	0.967294	0.935044	0.915247	0.857205	0.829586

Теперь, сравнив измерение pH в растворе 0.01 моль/л соляной кислоты с солью или без, получаем следующие значения:

Раствор 0,01 моль/л HCl	Раствор 0,01 моль/л HCl с 0,09 моль/л KCl
$pH = -\log_{10}(\gamma_{H^+}^x \cdot b_{H^+})$ $= -\log(0,01 \cdot 0,915)$ $= -\log(9,15 \cdot 10^{-3})$ $= 2,04$	$pH = -\log_{10}(\gamma_{H^+}^x \cdot b_{H^+})$ $= -\log(0,01 \cdot 0,829)$ $= -\log(8,29 \cdot 10^{-3})$ $= 2,08$

Буферные растворы - очень важная часть точного измерения pH . Стандартные буферные растворы используются для калибровки pH сенсоров и для проверки их работы. Самое главное качество буферного раствора (давнее ему название) - это буферная ёмкость. Это качество помогает буферному раствору иметь постоянное значение pH , даже если в буферный раствор вводятся вещества извне.

Буферная ёмкость буферного раствора основана на том факте, что слабые кислоты диссоциируют только частично, вызывая следующую реакцию равновесия.



В этом равновесии анион A^- может вести себя, как основание, поскольку он может удалять протоны из системы. Недиссоциировавшая кислота HA , тем не менее, может снабжать систему протонами.

Буферный раствор в положении равновесия имеет достаточно анионов (A^-), чтобы захватить любые протоны, добавляемые в систему, но также имеет достаточно недиссоциировавшей кислоты, чтобы восполнить любые протоны, взятые из системы. Поскольку недиссоциировавшая кислота HA может вести себя, как донор H^+ , а диссоциировавшая кислота A^- как акцептор H^+ , буферный раствор будет наиболее силён, когда HA и A^- присутствуют в равных концентрациях. Если сначала более пристально взглянуть на теорию буферных растворов, можно затем определить, насколько подходит определённый раствор в качестве буферного. Это зависит от нескольких свойств буферного раствора, таких, как буферная ёмкость, температурные влияния и изменения значения pH из-за разбавления буферного раствора. Эти качества задокументированы для многих стандартных буферных растворов и могут быть обнаружены в литературе [63].

Из вышеприведённой формулы можно записать константу равновесия для диссоциировавшей кислоты следующим образом:

$$K_a = \frac{[H^+][A^-]}{[HA]} \quad (2.28)$$

Её можно переписать как

$$\frac{1}{[H^+]} = \frac{1}{K_a} \frac{[A^-]}{[HA]} \quad (2.29)$$

и затем вычислить логарифм с обеих сторон:

$$\log_{10} \left(\frac{1}{[H^+]} \right) = \log_{10} \left(\frac{1}{K_a} \right) + \log_{10} \left(\frac{[A^-]}{[HA]} \right) \quad (2.30)$$

Поскольку

$$\log_{10} \left(\frac{1}{[H^+]} \right) = -\log_{10}(H^+) = pH \quad (2.31)$$

и

$$\log_{10} \left(\frac{1}{K_a} \right) = -\log_{10}(K_a) = pK_a \quad (2.32)$$

то мы получаем:

$$pH = pK_a + \log_{10} \left(\frac{[A^-]}{[HA]} \right) \quad (2.33)$$

Эта зависимость известна как уравнение Хендерсона-Хассельбальха. Из неё можно видеть, что если буферный раствор имеет свою полную силу и, следовательно, $[A^-] = [HA]$, то значение pH соответствует отрицательному логарифму константы диссоциации:

$$pH = pK_a \quad (2.34)$$

Это уравнение очень полезно при приготовлении буферного раствора слабой кислоты с известным значением pK_a .

Буферная ёмкость (β)

Буферная ёмкость – это способность буферного раствора поддерживать своё значение pH даже после добавления сильной кислоты или основания.

Как мы уже видели в предыдущем разделе, буферная ёмкость наиболее велика, при $pH = pK_a$, но общая буферная ёмкость слабой кислоты или основания ограничена до $pH = pK_a \pm 1$.

Влияние температуры на измерения pH . Температура имеет влияние и на электрод, и на образец. Мы рассмотрим более пристально это влияние.

Температура влияет на электрод несколькими различными

способами:

Угловой коэффициент. Посмотрев на уравнение Нернста, дающее соотношение между измеренным и реальным значениями pH образца для pH -электрода, можно увидеть, что угловой коэффициент содержит температуру в кельвинах:

$$E = E_0 + 2,3 \frac{RT}{nF} \log_{10} a_{H^+} \quad (2.35)$$

Когда подставлены все числа, кроме температуры в кельвинах (T), получаем:

$$E = E_0 - 0,198 \cdot T \cdot pH \quad (2.36)$$

Из этого уравнения можно ясно видеть, что угловой коэффициент электрода линейно зависит от температуры. Из-за этой линейной зависимости поведение полностью предсказуемо и может быть скомпенсировано с помощью pH -метра и электрода со встроенным температурным сенсором.

Точка пересечения изотерм. Точка пересечения изотерм зависит от поведения индивидуальных потенциалов от E_1 до E_6 и является характеристикой каждого электрода. Для идеального электрода линии калибровки различных температур пересекались бы в нулевой точке электрода (pH 7.00 при 0 мВ), а угловой коэффициент всегда был бы пропорционален абсолютной температуре.

Поскольку общий потенциал pH -электрода является суммой потенциалов E_1 – E_6 , каждый из которых имеет свою относительную температурную зависимость, точка пересечения изотерм не всегда может совпадать с нулевой точкой электрода.

Важно, чтобы точка пересечения изотерм и нулевая точка электрода были как можно ближе друг к другу, так как чем ближе они к pH 7, тем меньше будет погрешность в температурной компенсации. Погрешность измерения возрастает с увеличением разницы температур между раствором сравнения и раствором образца. Эти погрешности могут достигать порядка 0,1 единиц pH . Наиболее точное значение pH получается при идентичности температур калибровочного раствора и раствора образца.

Эти погрешности измерения проиллюстрированы на рис. 2.14.

Если реальная точка пересечения изотерм не совпадает с теоретической, погрешность измерения может быть достаточно большой, в зависимости от разницы температур между образцами или между образцом и калибровкой.



Рис. 2.14. точка пересечения изотерм:

Более того, погрешность может стать значительной, если реальная точка пересечения изотерм очень далека от теоретической точки пересечения изотерм, а измерение и калибровка проводились при разных температурах.

Температурный коэффициент определяется двумя параметрами:

- коэффициент активности γ ;
- константа кислотности pK_a .

Температурная зависимость коэффициента активности γ становится больше по мере удаления значения γ от 1, то есть при наличии большого отклонения активности раствора от концентрации. Это особенно верно для концентрированных растворов и растворов, содержащих ионы с высоким электрическим зарядом.

Константа кислотности pK_a также зависит от температуры, но это соотношение нелинейно; это означает, что поведение диссоциации кислоты изменяется с температурой. Это приводит к изменениям в концентрации H^+ и, следовательно, реальном значении pH при изменениях в температуре [61].

ГЛАВА III. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ОСНОВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

3.1. Анализ систем автоматической стабилизации процесса нейтрализации промышленных сточных вод

Успешное функционирование систем управления в значительной мере зависит от достоверности информации о свойствах управляемых объектов и процессов. Если такая информация имеется и характеристики управляемых объектов и воздействий внешней среды изменяются незначительно во времени или же эти изменения несущественно сказываются на конечном результате управления, то эффективное решение этих задач может и должно быть выполнено с помощью традиционных методов теории управления и соответствующими техническими средствами [52, 53].

Однако существует множество важных объектов и процессов практически во всех отраслях науки и техники, промышленности, отличающееся тем, что статические и динамические свойства объектов и процессов этого множества изменяются неконтролируемым образом, а априорные сведения об этих изменениях и о самих физических, математических и расчетных моделях «объект - внешняя среда» лишь в определенной степени соответствуют действительности. Такая ситуация характерна для многих технических приложений, в частности, для объектов, осуществляющих процессы нейтрализации сточных вод на основе систем регулирования pH [43, 54, 56].

Системы регулирования pH можно подразделить на два типа, в зависимости от требуемой точности регулирования. Если скорость изменения pH невелика, а допустимые пределы ее колебаний достаточно широки, применяют позиционные системы регулирования, поддерживающие pH в заданных пределах: $pH_H \leq pH \leq pH_B$. Ко второму типу относятся системы, обеспечивающие регулирование процессов, в которых требуется точное поддержание pH на заданном значении, например, в процессах нейтрализации. Для их регулирования используют непрерывные ПИ или ПИД регуляторы.

Общей особенностью объектов при регулировании pH является нелинейность их статических характеристик, связанная с нелинейной зависимостью pH от расходов реагентов. Для различных заданных значений pH на кривой титрования можно выделить три характерных участка: первый, относящийся к почти нейтральным средам, близок к

линейному и характеризуется очень большим коэффициентом усиления; второй и третий участки, относящиеся к сильно щелочным или кислым средам, обладают наибольшей кривизной.

На первом участке объект по своей статической характеристике приближается к релейному элементу. Практически это означает, что при расчете линейной системы регулирование коэффициента усиления регулятора настолько мал, что выходит за пределы рабочих настроек промышленных регуляторов. Так как, собственно реакция нейтрализации проходит практически мгновенно, динамические характеристики аппаратов определяются процессом смешения и в аппаратах с перемешивающими устройствами достаточно точно описываются дифференциальными уравнениями первого порядка с запаздыванием. При этом чем меньше постоянная времени аппарата, тем сложнее обеспечить устойчивое регулирование процесса, так как начинают сказываться инерционность приборов и регулятора и запаздывание в импульсных линиях.

Для обеспечения устойчивого регулирования pH применяют специальные системы. При этом для получения точных результатов используются кусочно-линейная аппроксимация кривой титрования, при которой линеаризованный объект имеет переменный коэффициент усиления:

$$\begin{aligned} k &= k_0 & \text{при } pH &\leq pH^0 - \delta, \\ k_1 &= k_2 & \text{при } pH &\geq pH^0 + \delta, \\ k &= k_0 & \text{при } pH - pH^0 &\leq \delta. \end{aligned} \quad (3.1)$$

На рис. 3.1 приведена структурная схема такой системы автоматического регулирования.

В зависимости от рассогласования ΔpH , включается в работу один из регуляторов, настроенный на соответствующий коэффициент усиления объекта.

Более эффективными для регулирования pH представляются системы автоматической стабилизации с большим контурным усилением, моделью и пассивной адаптацией. Структурные схемы такого рода систем представлены на рис. 3.2.

В системе с большим контурным усилением передаточная функция объекта записана в виде: $W_1^*(s) = k_1 W_1(s)$, а регулятора - $k_2 W_2(s)$.

Следуя [52, 53], составляющую полного приращения $\Delta x^{\Delta W_1^*}$ выхода системы при изменении передаточной функции $W_1^*(s)$ относительно расчетного состояния $W_1^{0*}(s) = k_1^0 W_1^0(s)$ можно записать в виде:

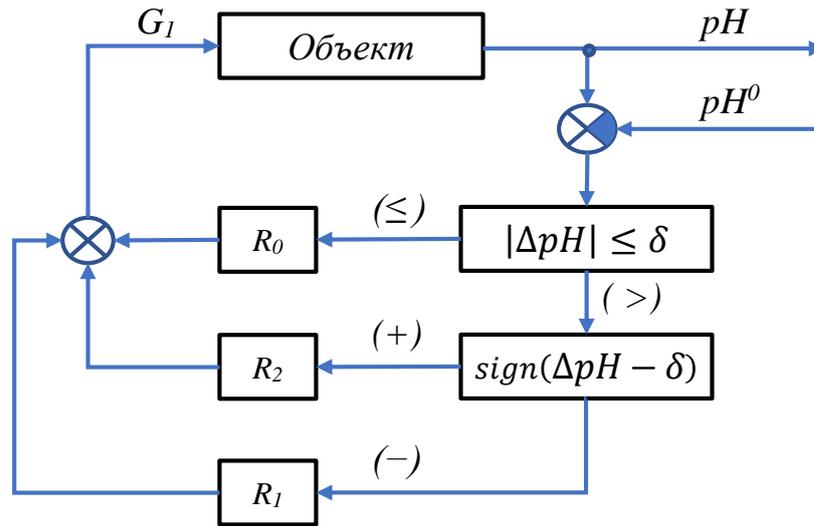


Рис. 3.1. Структурная схема системы регулирования pH с двумя регуляторами.

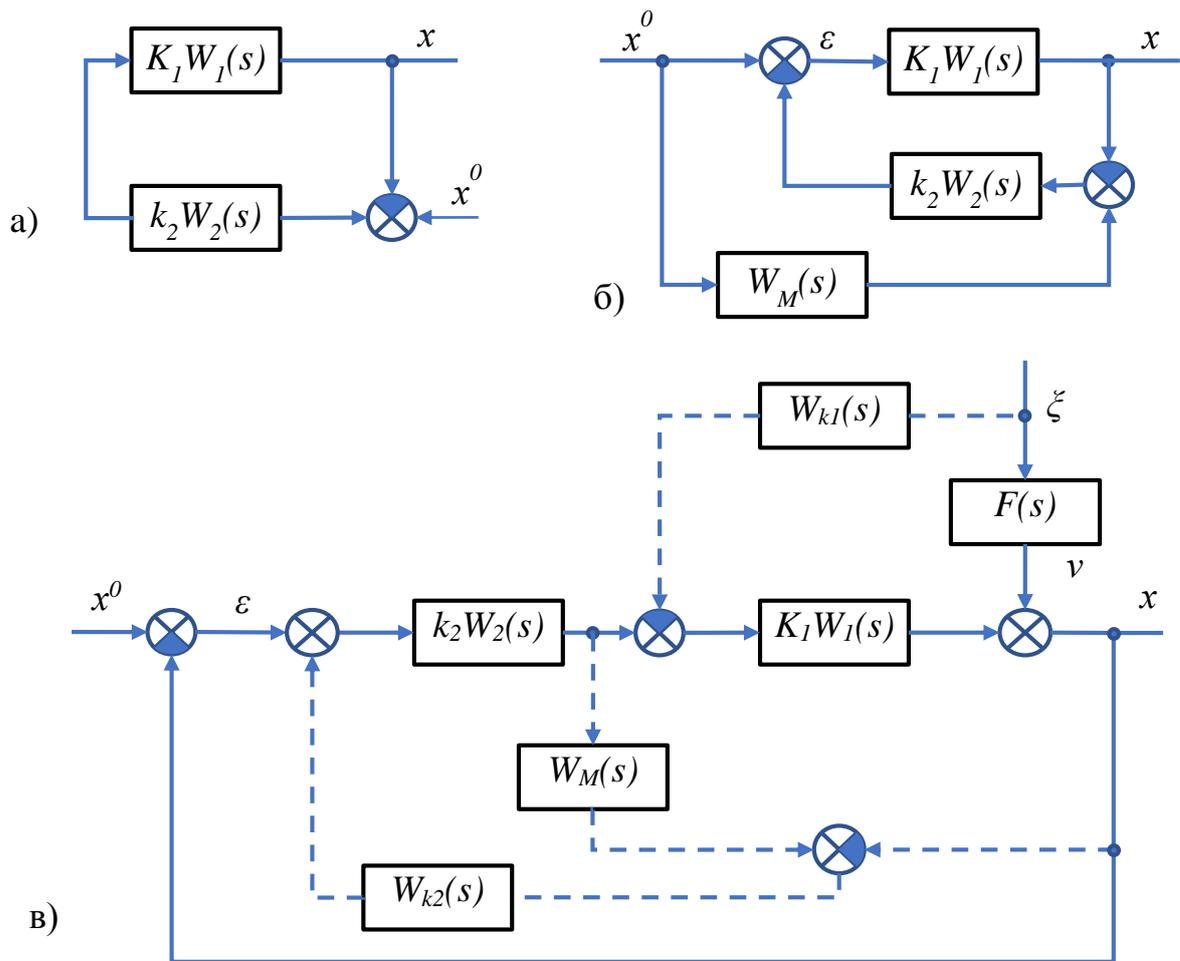


Рис. 3.2. Структурные схемы систем автоматической стабилизации с большим контурным усилением (а), моделью (б) и пассивной адаптацией (в).

$$\Delta x^{\Delta W_1^*}(s) = x^0(s) \frac{k_2 W_2(s)}{(1+k_1^0 k_2 W_1^0(s) W_2^0(s))^2} \Delta W_1^*(s) \quad (3.2)$$

При $|W_1^*(j\omega)(s)|_{0 \leq \omega < \infty} \neq 0$ компенсация приращения $\Delta x^{\Delta W_1^*}(j\omega)$ рассматриваемой структуре возможна при неограниченном росте контурного усиления: $k = k_1^0 k_2 \rightarrow \infty$. При бесконечно большом значении k одноконтурная система не чувствительна к изменению передаточной функции объекта $k_1 W_1(s)$ как в результате изменения ее параметров (в частности, коэффициента k_1), так и вследствие изменения самой структуры передаточной функции $W_1(s)$.

В этом смысле простейшая одноконтурная система обладает свойством пассивной адаптации. Однако рост k ограничен условием устойчивости: $k < k_{кр}$ и допустимым качеством переходных процессов; кроме того, при большом конкретном значении k свойство пассивной адаптации в одноконтурной системе может быть удовлетворительным с практической точки зрения для сравнительно узкого диапазона изменения параметров передаточной функции $k_1 W_1(s)$. Компенсация влияния изменения параметров $k_1 W_1(s)$ возможна также путем подстройки параметров передаточной функции $k_2 W_2(s)$ или путем введения с той же целью дополнительных корректирующих связей.

В системе стабилизации с моделью передаточные функции $k_1 W_1(s)$, $k_2 W_2(s)$ соответствуют объекту и регулятору, а модель с передаточной функцией $W_M(s)$, включенная параллельно объекту, выбирается в соответствии с желаемыми динамическими свойствами системы в целом.

В то же время приращение Δx , вызванное изменением передаточной функции объекта $W_1^*(s)$, для рассматриваемой системы с условной связью в соответствии с имеет вид:

$$\Delta x^{\Delta W_1^*}(s) = x^0(s) \frac{1+k_2 W_2(s) W_M(s)}{(1+k_2 W_2(s) W_1^{0*}(s))^2} \Delta W_1^*(s) \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) можно упростить, в частности, если модель выбрана с учетом расчетного состояния объекта, т.е. $W_1^{0*}(s) = W_M(s)$. Из (3.3) очевидно, что при $k = k_1^0 k_2 \gg 1$ система обладает пониженной (в предельном случае - нулевой) чувствительностью к вариациям $W_1^*(s)$, и при этом стабилизируется желаемый (расчетный) режим работы, определяемый моделью $W_M(s)$.

Для системы автоматической стабилизации с пассивной

адаптацией на основе методов теории адаптивных систем управления [52, 53] функцию чувствительности выходной переменной к какому-либо параметру c , передаточной функции $W_I(s)$ можно написать в виде:

$$u_x^{c_i}(s) = \frac{k_1 d(s)}{\Delta^2(s)} \frac{dW_1(s)}{\delta c_i} \left\{ x^0(s) k_1 W_1(s) + v(s) \frac{1+(1+d(s))k_2 W_2(s)W_M(s)}{(1+d(s))W_M(s)} \right\} \quad (3.4)$$

Иначе говоря, реакция $x(t)$ на входное воздействие $x^0(t)$ и возмущение $v(t)$ будет определяться выражением:

$$x(s) = x^0(s) \frac{k_2 W_2(s) W_M(s)}{1+k_2 W_2(s) W_M(s)}, \quad (3.5)$$

т.е. выходная переменная системы $x(s)$ не зависит от передаточной функции объекта и ее изменений и от приведенного к выходу системы эквивалентного возмущения $v(s)$. В реальных условиях $|d(j\omega)| \neq 0$, однако чувствительность $x(t)$ к изменению коэффициентов $k_1 W_1(s)$ может быть сделана весьма малой.

Результаты моделирования рассматриваемых методов на различных модельных задачах показали, что системы автоматической стабилизации с большим контурным усилением, моделью и пассивной адаптацией обеспечивают большую степень устойчивости и высокое качество процессов регулирования по сравнению со системой регулирования с двумя регуляторами (рис. 3.1). При этом более лучший результат обеспечивает система автоматической стабилизации с пассивной адаптацией.

3.2. Система адаптивного субоптимального управления процессом механического обезвоживания осадков сточных вод

В общей проблеме охраны окружающей среды от естественного и антропогенного воздействий, рационального использования и воспроизводства природных ресурсов борьба с загрязнением водоёмов бытовыми и производственными сточными водами является исключительно актуальной. Социально-экологическая сторона проблемы во многих случаях удачно совмещается с чисто экономической, поскольку огромное количество безвозвратно теряемых ценных веществ может, при их оптимальном извлечении и использовании, значительно пополнить сырьевые ресурсы. Практически все современные очистные сооружения состоят из большого числа

разнотипных машин и аппаратов, связанных между собой сложной технологической схемой. Характер этих связей может быть весьма различным: сточные воды сырой и избыточный ил, суспензии и сброженные осадки, обрабатываемые в одних аппаратах, поступают в следующие по ходу процесса сооружения; побочные продукты очистки, получаемые на одном участке системы, утилизируются на другом; исходные, промежуточные и конечные материальные потоки распределяются между различными потребителями [80, 81].

Задача автоматизации управления такими природоохранными системами состоит не только в том, чтобы поддерживать наиболее эффективный режим в каждом аппарате или сооружении в отдельности, но и в том, чтобы установить между элементами технологической схемы связи, обеспечивающие оптимальную работу всей системы в целом. В условиях массового строительства предприятий по очистке городских и производственных сточных вод проблема повышения эффективности систем механического обезвоживания осадков является наиболее острой и её решению в настоящее время уделяется повышенное внимание [81, 84].

Общая особенность физической сущности процесса обезвоживания осадков в фильтрах периодического и непрерывного действия заключается в создании перепада давления на пористой фильтровальной перегородке, пропускающей жидкую фазу суспензии (удаляемой из фильтра) и задерживающей частицы твёрдой фазы, образующей влажный осадок. Исходная суспензия подаётся на фильтровальную перегородку самотёком или под давлением, создавая при этом на перегородке разность давлений, которая и является движущей силой процесса. В процессе фильтрования одновременно происходят следующие подпроцессы: накопление твёрдой фазы (осадка) и жидкой (фильтрата); уплотнение осадка, забивка пор фильтровальной перегородки. К входным координатам фильтра как объекта управления можно отнести концентрацию суспензии её вязкость, гранулометрический состав твёрдой фазы суспензии, физикохимические свойства жидкой и твёрдой фаз суспензии. При этом выходными координатами являются концентрация фильтрата, количество фильтрата, полученное за одну операцию фильтрования, сопротивление процессу фильтрования, а также уровень суспензии в ванне. В качестве управляющих параметров в фильтрах могут быть использованы частота вращения привода рабочего органа фильтра (барабана, диска, ленты и др.), расход исходной суспензии, движущая сила процесса фильтрования, а также число циклов работы фильтровальной перегородки до её замены [73].

Случайные колебания количественных и качественных характеристик осадков и дрейф характеристик оборудования определяют нестационарность процесса, а отсутствие необходимых датчиков характеризуют процесс обезвоживания как объект с неполной информацией. Структура систем управления процессами обезвоживания в значительной степени обуславливается свойствами потоков обрабатываемых осадков и конструктивными особенностями оборудования. В то же время, имеются и общие для всех типов используемых машин и аппаратов признаки, на базе которых различают три основных класса системы управления. Первые два из них - это параметрические и программные системы, в задачу которых входит обеспечение работоспособности оборудования, но которые в большинстве случаев не обеспечивают поиск и поддержание оптимальных режимов его работы. Более совершенными и приспособленными к реализации эффективных режимов работы фильтров и центрифуг являются, так называемые, программно-параметрические (комбинированные) системы управления, под которыми понимают либо программные системы, дополненные контурами стабилизации параметров режимов работы оборудования, либо параметрические, дополненные программным устройством, обеспечивающим изменение настроек регуляторов по некоторой специальной программе.

Практическое использование всех перечисленных систем управления определяется возможностями оперативного измерения технологических параметров. К их недостаткам можно отнести отсутствие возможности автоподстройки режима работы оборудования, а также неизменность структуры и параметров настройки. В условиях нестационарности характеристик процессов фильтрования и центрифугирования такое управление не позволяет получать осадки (кек) заданного качества по влажности и приводит к дополнительным энергетическим затратам. Наличие большого числа внешних возмущающих воздействий процесса обезвоживания (колебаний расхода и состава обрабатываемых потоков, температуры, давлений и др.), а также внутренних возмущений (нестационарность характеристик оборудования), с одной стороны, и отсутствие надёжных средств контроля основных параметров процесса с другой, приводит к необходимости создания адаптивных систем управления [62]. Использование таких систем в практике автоматизации процессов обезвоживания осадков позволит обеспечивать оптимальные режимы эксплуатации фильтров и центрифуг в условиях дрейфа их характеристик и колебаний технологических параметров.

Таким образом, высокие требования, предъявляемые к качеству функционирования современных систем механического обезвоживания осадков сточных вод, приводят к необходимости разработки и практической реализации адаптивных методов и алгоритмов управления, позволяющих осуществить оптимизацию процессов управления, обеспечить работоспособность системы управления при изменении динамических характеристик объекта, повысить надежность ее работы.

Будем полагать, что рассматриваемый объект описывается уравнением

$$x_{t+1} = A_{0t}x_t + B_{0t}u_t + w_t, \quad x_{t_0} = x_0 \quad (3.6)$$

$$y_t = Cx_t + v_t, \quad (3.7)$$

где x_t - вектор состояния системы размерности n ; u_t - вектор управления размерности m ; y_t - вектор наблюдения размерности l ; w_t и v_t , - векторы шума объекта и помехи наблюдения размерности n и l соответственно. При этом

$$M[x_0] = 0, \quad M[x_0x_0^T] = X_0, \quad M[w_t] = M[v_t] = 0, \quad M[x_0v_t^T] = 0, \\ M[x_0w_t^T] = 0, \quad M \left[\begin{pmatrix} w_t \\ v_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_t^T & v_t^T \end{pmatrix} \right] = \begin{bmatrix} W & G \\ G^T & V \end{bmatrix} \delta_{1-\tau} = 0,$$

A_{0t} , B_{0t} , W , V и G - неизвестные матрицы соответствующих размерностей; $\delta_{1-\tau}$ - символ Кронекера.

Требуется построить управление u_t , субоптимальное в смысле минимума функционала качества

$$J(x, u) = \frac{1}{2} M \left[x_T^T F x_T + \sum_{t=t_0}^T (x_t^T u_t^T) \begin{pmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t \\ u_t \end{pmatrix} \right], \quad (3.8)$$

где Q - положительно полуопределенная матрица размерности $(n \times n)$, F , R - положительно определенные матрицы размерности $(n \times n)$ и $(m \times m)$ соответственно, $T-t_0$ задано и значительно превосходит постоянную времени объекта, u_t не ограничено.

Пусть параметры объекта (3.6) A_{0t} и B_{0t} имеют вид $A_{0t} = A^0 + a_t$, $B_{0t} = B^0 + b_t$, т.е. заранее заданы эталонные значения параметров A^0 и B^0 , которые в отсутствие параметрических возмущений должны определять динамику объекта.

Тогда, следуя [60], можно показать, что оптимизацию системы управления можно осуществлять за счет адаптивного координатного управления объектом

$$u_t = H_{1t}\hat{x}_t + [H_{2t} + I]u_{1t} \quad (3.9)$$

и настройки матрицы усиления фильтра

$$\hat{x}_{t+1} = A^0\hat{x}_t + B^0u_t + K_{\phi t}[y_t - C\hat{x}_t], \quad \hat{x}_{t_0} = 0, \quad (3.10)$$

построенного для объекта с эталонными значениями параметров A^0 и B^0 и в этом смысле выполняющего роль модели объекта. В выражении (3.9) H_{1t} и H_{2t} - матрицы настраиваемых коэффициентов прямой и обратной связи, I - единичная матрица, u_{1t} определяется выражением

$$u_{1t} = \begin{cases} -R^{-1}(B^0)^T S_t^0 \hat{x}_t & \text{при } t_0 \leq t < t_0 + \tau, \\ -R^{-1}(B^0)^T S_t^0 \hat{x}_t - \theta_t & \text{при } t_0 + \tau \leq t, \end{cases}$$

где \hat{x}_t - решение уравнения (3.10), $\theta_t = D_t u_{t-\tau}$, D_t - матрица размерности $m \times 1$, элементы которой $d_{ij,t}$ - линейно независимые функции времени, причем для любых $i=1, \dots, m, j=1, \dots, l$ $|d_{ij,t}| < \text{const}$, матрица S_t^0 является решением уравнения типа Риккати:

$$S_{t+1}^0 = -(A^0)^T S_t^0 - S_t^0 A^0 + S_t^0 B^0 R^{-1} (B^0)^T S_t^0 - Q, \quad S_{t_0}^0 = F$$

Подставляя (3.9) в уравнение объекта (3.6) и учитывая, что $\hat{x} = x - \zeta$, можно получить уравнение замкнутого основного контура в виде

$$\hat{x}_{t+1} = [A_{0t} + B_{0t}H_{1t}]x_t + [B_{0t} + B_{0t}H_{2t}]u_{1t} - B_{0t}H_{2t}\zeta_t + w_t, \quad x_{t_0} = x_0, \quad (3.11)$$

где ζ_t - ошибка наблюдения состояния объекта x_t .

Задача адаптивного регулятора состоит в том, чтобы в любой момент времени обеспечить выполнение условий

$$B_{0t}H_{1t} = \Delta a_t, \quad B_{0t}H_{2t} = \Delta b_t,$$

где Δa_t и Δb_t - параметры уравнения

$$x_{t+1} = (A^0 + a_t + \Delta a_t)x_t + (B^0 + b_t + \Delta b_t)u_t + w_t, \quad x_{t_0} = x_0,$$

определяемые алгоритмами настройки конструктивных параметров объекта на основе модифицированного уравнения Винера-Хопфа [60, 104], и удовлетворяющие условию

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (A^0 + a_t + \Delta a_t) = A^0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (B^0 + b_t + \Delta b_t) = B^0.$$

Структурная схема системы стабилизации объекта с адаптивным координатным управлением представлена на рисунке 3.3.

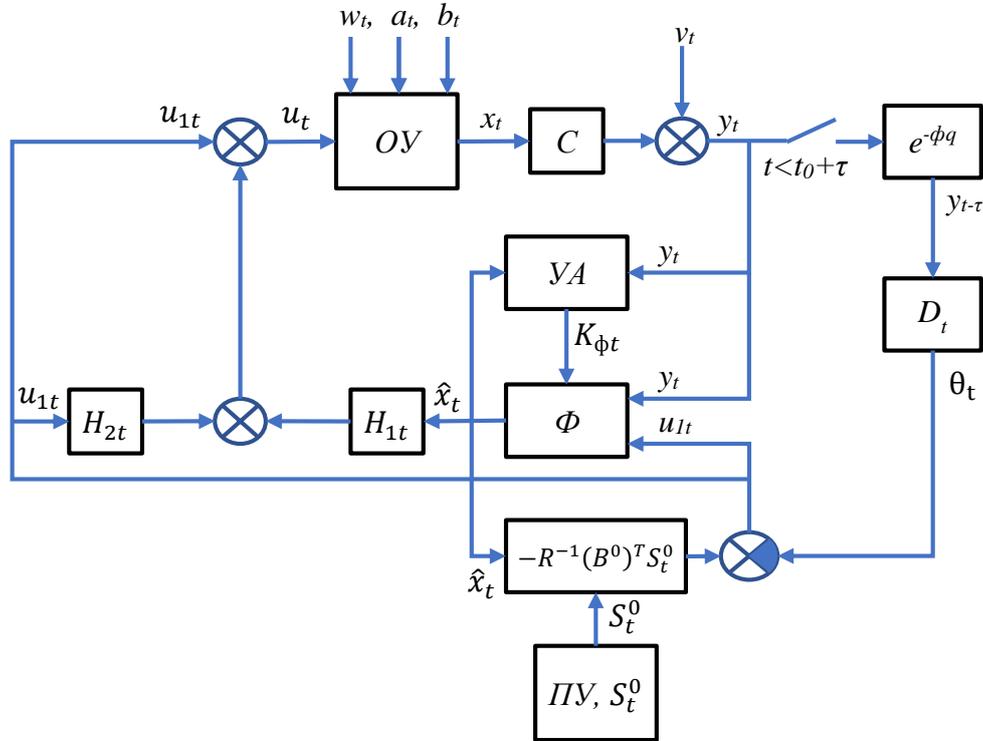


Рис. 3.3. Структурная схема системы стабилизации объекта (3.6) с адаптивным координатным управлением (3.9): ОУ - объект управления, УА - устройство адаптации, Ф - фильтр, ПО - программа управления S_t^0 .

Тогда коэффициенты адаптивного регулятора с учетом условий адаптируемости могут быть определены на основе соотношений [104, 110]:

$$H_{1t} = B_{0t}^+ \Delta a_t, \quad H_{2t} = B_{0t}^+ \Delta b_t,$$

где B_{0t}^+ - псевдообратная по отношению к B_{0t} матрица. Поскольку B_{0t} неизвестна, то при достаточно малой $\|B_{0t} - B^0\|$ для определения H_{1t} и H_{2t} , могут быть использованы приближенные соотношения

$$B^0 H_{1t} = \Delta a_t, \quad (3.12)$$

$$B^0 H_{2t} = \Delta b_t, \quad (3.13)$$

Появление ошибки фильтрации в уравнении основного контура (3.11) и использование приближенных матриц вместо неизвестной

матрицы V_{0t}^+ приводит к ухудшению процессов фильтрации, адаптации и управления в замкнутой системе адаптивного координатного управления.

Системы уравнений (3.12), (3.13) могут быть плохо обусловленными, т.е. малым изменениям исходных данных могут отвечать большие изменения решения. Отмеченное обстоятельство при решении этих уравнений приводит к необходимости применения методов регуляризации [96]. Условия аппроксимации исходных данных в уравнениях (3.12), (3.13) примем в виде:

$$\|B_{0t} - \bar{B}^0\| \leq h, \quad \|\Delta a_t - \bar{\Delta a}_t\| \leq \delta_1, \quad \|\Delta b_t - \bar{\Delta b}_t\| \leq \delta_2,$$

где $\bar{B}^0, \bar{\Delta a}_t, \bar{\Delta b}_t$ - точные значения соответствующих матриц.

Для регуляризации решения уравнений (3.12), (3.13) будем использовать метод регуляризации Тихонова

$$H_{1t} = ((B^0)^T V^0 + \alpha I)^{-1} (B^0)^T \Delta a_t, \quad (3.14)$$

$$H_{2t} = ((B^0)^T V^0 + \alpha I)^{-1} (B^0)^T \Delta b_t, \quad (3.15)$$

где $\alpha > 0$ - параметр регуляризации.

Если числа δ_1, δ_2 и h известны, то параметр регуляризации можно выбирать на основе метода обобщенной невязки, если же числа δ_1, δ_2 и h неизвестны, то параметр регуляризации целесообразно выбирать на основе способов квазиоптимальности или перекрестной значимости.

Практическая реализация приведенных адаптивных алгоритмов позволит повысить точность процессов управления, обеспечить устойчивость процедуры настройки конструктивных параметров рассматриваемого объекта при изменении его динамических характеристик.

3.3. Математическая модель процесса биологической

очистки сточных вод

Для обобщения количественных взаимосвязей между факторами процесса, позволяет и проведения анализа их ролей во взаимодействии, а также определения оптимальных условий ведения процесса. Для этого необходимо составить математическую модель.

Математическая модель служит для выяснения потенциальных возможностей изучаемого объекта, позволяет интенсифицировать процессы., т.к. в математических моделях удобно описываются взаимосвязь субстрата и микроорганизмов активного ила требуется использовать уравнения ферментативных реакций.

Отдельные моменты требуют серьезных коррективов: необходимо обобщение экспериментального материала о влиянии на кинетику процесса дозы ила и концентрации растворенного кислорода, а также данных, отражающих существо процесса разделения иловых смесей.

Результаты исследований и данные ряда авторов [48, 49], изучавших отдельные стадии процесса биологической очистки, позволяют составить математическую модель этого процесса с учетом взаимодействия основных стадий биохимического окисления. С помощью этой модели может быть выполнена оптимизация известных технологических схем, а также процессов с высокими концентрациями активного ила и растворенного кислорода, осуществляемых в окситенках.

Математическая модель процесса биологической очистки сточных вод в общем виде представлена на рис. 3.4. В соответствии с этой схемой сточная вода поступает в аэротенк - A , затем в илоотделитель, где происходит изъятие основной массы активного ила, направляемой далее в регенератор P . После илоотделителя вода осветляется во вторичном отстойнике BO , либо в другом сооружении или аппарате и удаляется из системы.

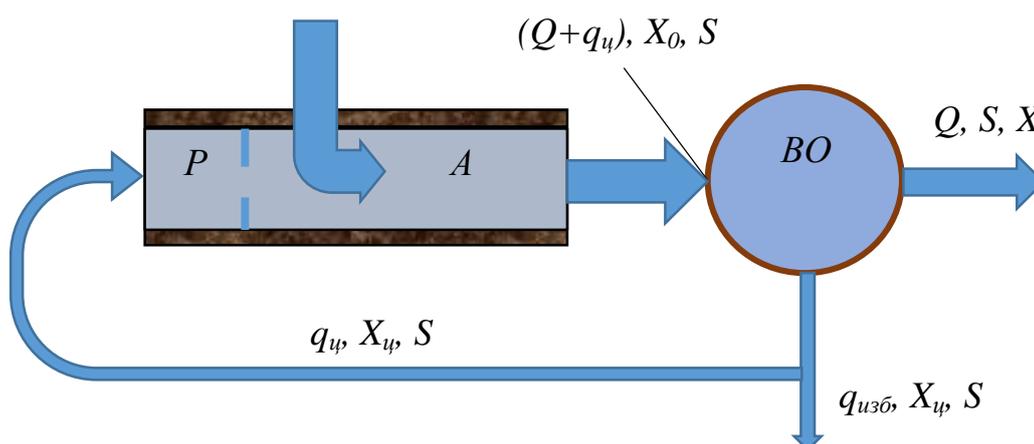


Рис. 3.4. Технологическая схема процесса биологической очистки сточных вод.

Как видно из схемы математической модель процесса состоит из трех групп уравнений:

1. Уравнения баланса веществ;
2. Уравнения элементарных реакций для отдельных стадий процесса;
3. Теоретические и полуэмпирические соотношения между различными факторами.

Вследствие многофакторности и большого числа связей между отдельными стадиями биологической очистки сточных вод расчеты по определению констант и коэффициентов системы уравнений его математической модели использовать MATLAB, Mathcad [57].

Как показано на рис 3.5 процесс биологической очистки основных компонентов сточных вод состоит из ряда последовательных операций.

На основе рассмотренной технологической схемы процесса биологической очистки сточных вод (рис. 3.4) стехиометрические уравнения основных его операций можно представить в следующем виде:

- сорбция веществ активной частью биомассы ила и образование внутриклеточного субстрата



- окисление внутриклеточного субстрата с образованием активной биомассы и продуктов окисления



- распад активной биомассы с образованием автолизата и инертной части биомассы



где S — концентрация субстрата в воде; X — концентрация активной массы микроорганизмов активного ила; X_1 — концентрация отмерших микроорганизмов; X_2 — концентрация инертной биомассы; C_k — концентрация растворенного кислорода; S_1, S_2, S_3, S_4 — концентрации субстрата внутри клетки, продуктов биохимического окисления, продуктов автолиза клеток и метаболитов; k_1, k_2, k_3 — стехиометрические коэффициенты; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ — коэффициенты пропорциональности.

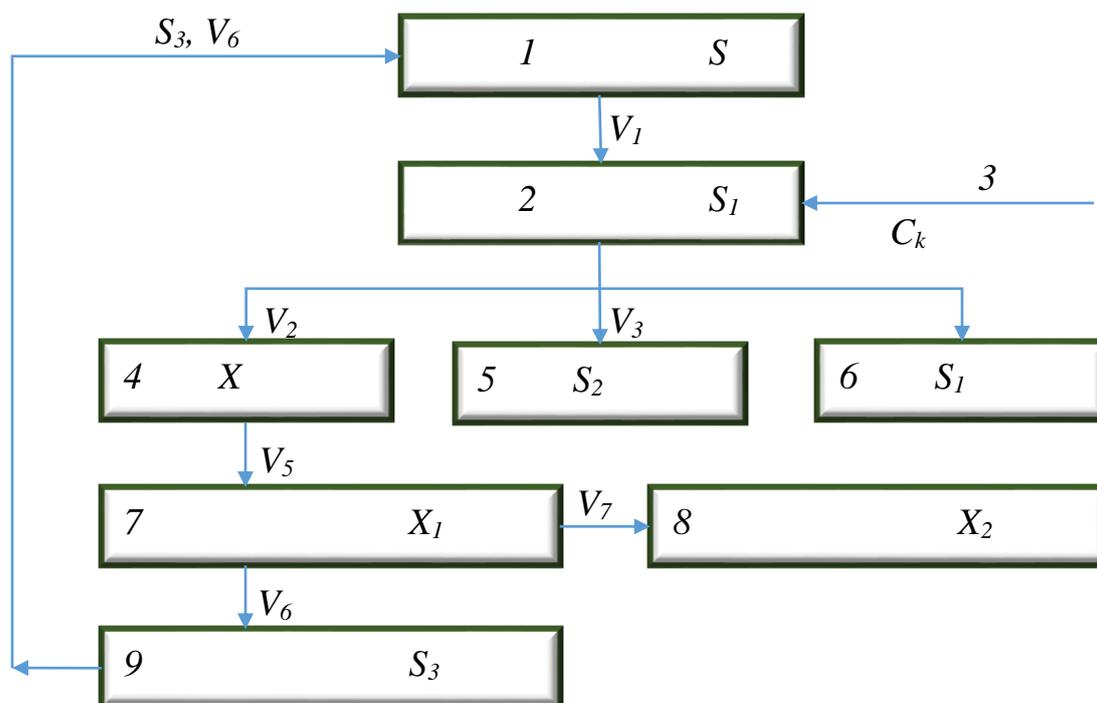


Рис3.5. Схема взаимодействия основных компонентов реакций при биологической очистке сточных вод, где 1 — растворенный субстрат; 2 — внутриклеточный субстрат; 3 — растворенный кислород; 4 — активная биомасса; 5 — инертные продукты окисления; 6 — продукты эндогенного дыхания; 7 — автолизированная биомасса; 8 — инертная биомасса; 9 — автолизат.

Известно, что скорость сорбции субстрата активным илом удобно описать использованием уравнения Лангмюра:

$$V_1 = \frac{dS}{dt} = K_1 \frac{S}{1/A_1 + S} \quad (3.19)$$

где K_1 и A_1 — эмпирические константы, зависящие от вида субстрата.

Скорость роста биомассы с учетом влияния концентрации кислорода и микроорганизмов активного ила может быть описана модифицированным уравнением ферментативных реакций:

$$V_2 = \frac{dX}{dt} = y \frac{V_{max} S_1 C_k X}{S_1 C_k + K_s C_k + K_k S_1} \left(\frac{1}{1 + \varphi X} \right) \quad (3.20)$$

где y — экономический коэффициент; V_{max} — максимальная скорость окисления субстрата; K_s , K_k — константы диссоциации субстрата и кислорода; φ — коэффициент ингибирования продуктами метаболизма.

Скорость образования продуктов окисления в первом приближении

можно представить в виде уравнений I порядка:

$$V_3 = \frac{dS_2}{dt} = k_2 \alpha_1 S_1 = A_3 S_1 . \quad (3.21)$$

Скорость потребления субстрата на поддержание жизнедеятельности

$$V_4 = \frac{dS_1}{dt} = k_2 \alpha_2 X = A_4 X . \quad (3.22)$$

Скорость отмирания ила (автолиза)

$$V_5 = \frac{dX_1}{dt} = k_3 \alpha_3 X = A_5 X . \quad (3.23)$$

Скорость образования автолизата

$$V_6 = \frac{dS_3}{dt} = A_6 X . \quad (3.24)$$

Скорость образования инертной части биомассы ила

$$V_5 = \frac{dX_2}{dt} = k_3 \alpha_4 X = A_7 X . \quad (3.25)$$

На основе схемы (рис. 3.5) и уравнений (3.16) - (3.25) система дифференциальных уравнений для периодического процесса биохимического окисления может быть представлена следующим образом.

Скорость изменения концентрации растворенного субстрата

$$\frac{dS}{dt} = V_6 - V_1 = A_6 X - K_1 \frac{S}{1/A_1 + S} \quad (3.26)$$

Скорость изменения концентрации внутриклеточного субстрата

$$\begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} = V_1 - V_2 - V_3 - V_4 = K_1 \frac{S}{1/A_1 + S} - \\ - y \frac{V_{max} S_1 C_k X}{S_1 C_k + K_s C_k + K_k S_1} \left(\frac{1}{1 + \phi X} \right) - A_3 S_1 - A_4 X . \end{aligned} \quad (3.27)$$

Скорость изменения концентрации активной биомассы ила

$$\frac{dX}{dt} - V_2 - V_5 = y \frac{V_{max} S_1 C_k X}{S_1 C_k + K_s C_k + K_k S_1} \left(\frac{1}{1 + \varphi X} \right) - A_5 X \quad (3.28)$$

Скорость изменения концентрации инертной биомассы

$$\frac{dX_2}{dt} = V_5 - V_6 - V_7 = A_5 X - A_6 X - A_7 X \quad (3.29)$$

Из уравнений (3.21)—(3.25) получим:

$$\frac{dS_2}{dt} = A_3 X, \quad (3.30)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = A_4 X, \quad (3.31)$$

$$\frac{dX_1}{dt} = A_5 X, \quad (3.32)$$

$$\frac{dS_3}{dt} = A_6 X, \quad (3.33)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = A_7 X. \quad (3.34)$$

Если учесть материальный баланс вещества в нашей рассматриваемой замкнутой системе получим:

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 + V_7 = 0, \quad \text{т.е.}$$

$$\frac{dS}{dt} + \frac{dX}{dt} + \frac{dS_2}{dt} + \frac{dS_1}{dt} + \frac{dX_1}{dt} + \frac{dS_3}{dt} + \frac{dX_2}{dt} = 0. \quad (3.35)$$

Коэффициенты уравнений (3.26) - (3.35) определялись по данным экспериментальных исследований, выполненных в непроточных условиях. Константы определяются эмпирически при отсутствии лимитирования процесса кислородом. С учетом сказанного, а также имея в виду, что в условиях контактного опыта доза ила меняется незначительно, для определения искомых коэффициентов уравнения (3.26) - (3.35) могут быть несколько упрощены. Учитывая относительно малые скорости процесса, в первом приближении дифференциалы могут быть заменены приращениями.

В этом случае основные уравнения примут вид:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} \approx A_6 X - K_1 \frac{S}{1/A_1 + S} X \quad (3.36)$$

$$\frac{\Delta S_1}{\Delta t} = K_1 \frac{S}{1/A_1 + S} X - V_{max} \frac{S_1 X}{K_s + S_1} - A_4 X \quad (3.37)$$

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = y \frac{V_{max} S_1 X}{K_s + S_1} - A_5 X \quad (3.38)$$

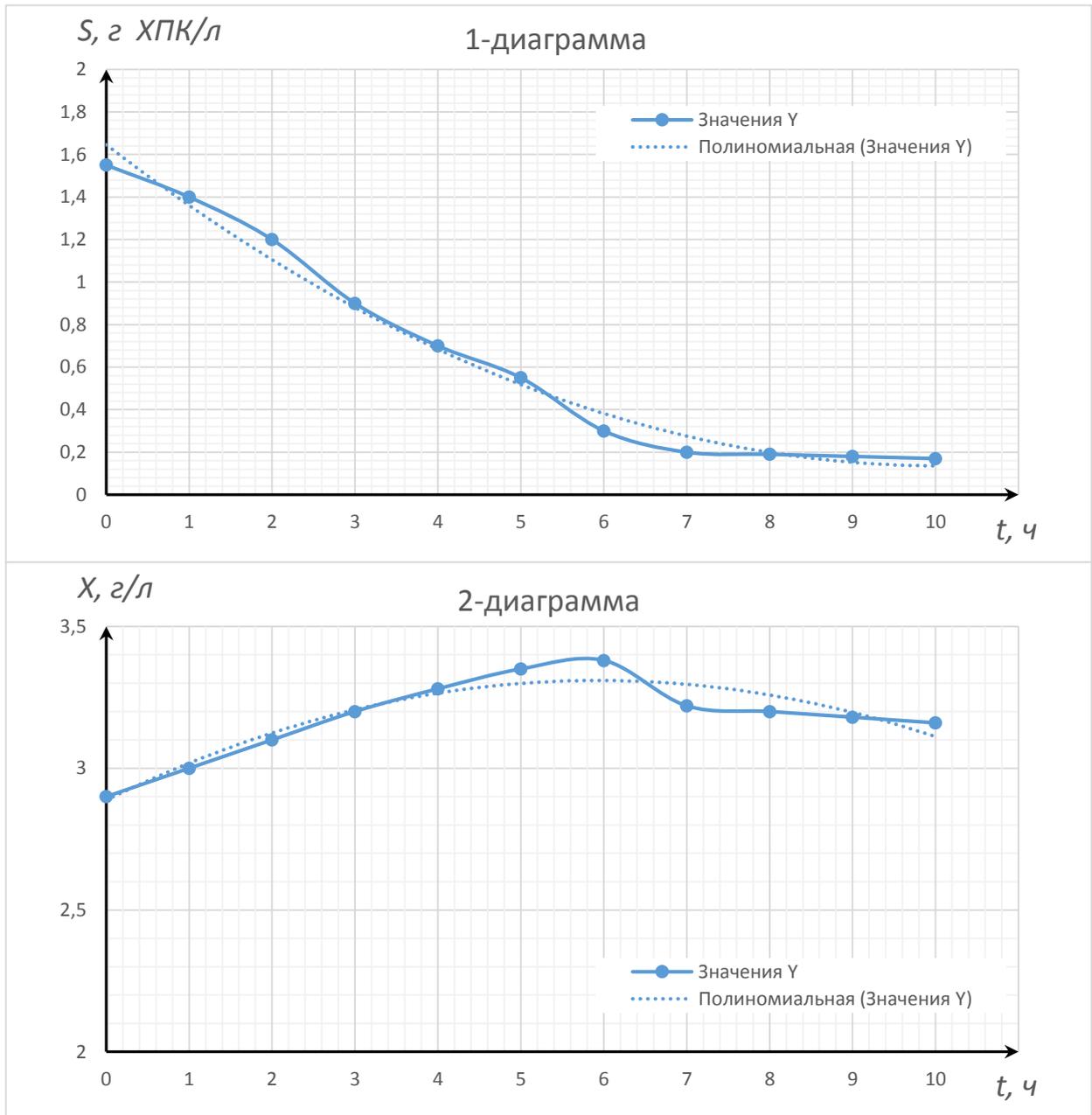


Рис. 3.5. Кинетика изъятия субстрата (1 диаг.) и прирост активного ила (2 диаг.) при биохимическом окислении ацетона

$$\frac{\Delta X_1}{\Delta t} = A_5 X - A_6 X - A_7 X \quad (3.39)$$

Коэффициент A_4 , характеризующий потребление субстрата на поддержание жизнедеятельности ила, определяется из уравнения (3.37) при условии, что $\Delta X/\Delta t=0$, т. е. для момента времени, когда исчерпан внутриклеточный субстрат и скорость сорбции равна скорости окисления: $\Delta S_1/\Delta t = -A_4 X$, откуда

$$A_4 = \frac{-\Delta S_1}{\Delta t X} \quad (3.40)$$

Коэффициент A_5 , характеризующий скорость отмирания ила в первом приближении, может быть определен из уравнения (3.38) за относительно небольшой интервал времени после прекращения роста биомассы ила:

$$A_5 = \frac{-\Delta X}{\Delta t X} \quad (3.41)$$

затем A_5 уточняется с учетом роста ила за счет автолизата.

Экономический коэффициент y определяется из уравнения (3.38) за период роста биомассы

$$y = \frac{\Delta X + A_5 X \Delta t}{\Delta S} \quad (3.42)$$

Адекватность рассмотренной выше математической модели биологической очистки сточных вод экспериментальным данным подтверждена опытами с различной сточной водой, проводившимися на модели азротенка-вытеснителя. Результаты одного из опытов представлены на рис. 3.5; там же приведены расчетные кривые, сопоставление которых указывает на удовлетворительное совпадение расчетной кинетической кривой $S = f(t)$ с экспериментальной, так как максимальное расхождение не превышает 20%. Наибольшее расхождение функций $X=f(t)$ достигает 7% на стадии автолиза активного ила.

3.4. Математическое моделирование и управление качеством очистки сточных вод

Оценке и управления качеством очистки сточных вод как отдельных городов и регионов в целом, основное значение имеет развитие мониторинга источников загрязнения с учетом специфики промышленного производства и других видов хозяйственной деятельности. Важным звеном такой системы является автоматизированная система мониторинга очистных сооружений.

При этом необходимо связанных с прогнозированием, оперативным управлением и контролем за качеством процесса водоочистки, необходимо комплексное описание гидродинамических,

гидрохимических и гидробиологических процессов. Для этого воспользуемся методами системного анализа и математического моделирования [94, 76, 87].

Как отмечено в [69] реальные модели опираются, на несколько простейших физикохимических ее параметров: растворенный кислород (РК), биохимическое потребление кислорода (БПК), химическое потребление кислорода (ХПК), концентрация консервативной примеси. Особенностями этих параметров является то, что они отражают мгновенное состояние водной среды, без которого затрудняется оперативное управление и контроль ее качества [41, 51].

В большинстве случаев практически невозможно определить концентрации органических веществ, содержащихся в сточной воде в отдельности, так же, как и отдельных видов микроорганизмов в активном иле. При рассмотрении процессов биологической очистки мы провели исследования процесса изменения суммарной концентрации загрязнителя и суммарной биомассы микроорганизмов.

Процесс аэробной биологической очистки можно представить в виде следующей формализованной схемы (рис. 3.6).

Автором проведен анализа действующих систем очистки сточных вод, экспериментальных исследований структуры потоков в аэротенке, с учетом материального баланса и гидродинамической структуры потоков, стехиометрических соотношений, кинетики ферментативных реакций, массопередачи кислорода разработана адаптивная модель процесса аэробной биологической очистки сточных вод.

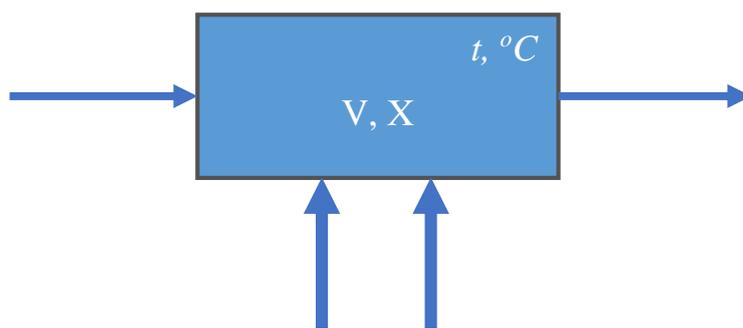


Рис. 3.6. Формализованная схема, где L_{in} – концентрация поступающей сточной воды, мг/л; L_{out} – концентрация очищенной воды, мг/л; V – объем реактора, m^3 ; Q – расход поступающей сточной воды, $m^3/ч$; X – концентрация активного ила в реакторе, г/л.

Математическая модель процесса очистки сточных вод в аэротенке составлена в виде системы дифференциальных уравнений материального баланса, описывающих динамику изменения концентраций загрязнений, активного ила и растворенного кислорода:

$$\frac{dL_{out}^j}{dt} = \frac{Q_{liq}(1+R_i)}{V_i} (L_{out(i-1)}^j - L_{out(i)}^j) + R_{L_i}^j, \quad (3.43)$$

где $L_{out(i)}^j$ и $L_{out(i-1)}^j$ - концентрация j -го компонента в рассматриваемой i -й ячейке и в предыдущей, мг/л; $V_i = V_a/N_a$ - объем i -й ячейки, м³; V_a - расход поступающей сточной воды, м³/ч; R_i - коэффициент рециркуляции активного ила; $R_{L_i}^j$ - скорость потребления j -го субстрата в i -й ячейке в соответствии с адекватной моделью, мг/л·ч;

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{Q_{liq}(1+R_i)}{V_i} (X_{i-1} - X_i) + R_{X_i} \quad (3.44)$$

где X_i и X_{i-1} - концентрация активного ила в рассматриваемой i -й ячейке и в предыдущей, г/л; R_{X_i} - скорость накопления активного ила в соответствии с адекватной моделью, гX/л·ч;

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q_{liq}(1+R_i)}{V_i} (C_{i-1} - C_i) + KLa(C_a - C_i) + R_{C_i} \quad (3.45)$$

где C_i и C_{i-1} - концентрация кислорода в рассматриваемой i -й ячейке в предыдущей, мг/л; KLa - коэффициент массопередачи кислорода, ч⁻¹; C_a - концентрация насыщения воды кислородом при заданных температуре и давлении, мг/л; R_{C_i} - скорость потребления кислорода, мгO₂/л·ч.

В качестве краевых условий для решения уравнений (3.43)- (3.45) приняты параметры первой ячейки:

$$X_{i-1} = \frac{X_r R_i}{1+R_i} \quad (3.46)$$

где X_r - концентрация активного ила в рециркуляционном потоке, г/л;

$$L_{out(i-1)} = \frac{L_{out} R_i + L_{in}}{1+R_i} \quad (3.47)$$

где L_{in} - концентрация j -го компонента в поступающей на очистку воде, мг/л;

$$C_{i-1} = \frac{C_{sv} + C_{vi} R_i}{1+R_i} \quad (3.48)$$

где C_{sv} , C_{vi} - КРК в поступающей на очистку воде и рециркуляционном потоке активного ила, мг/л. Обычно принимают $C_{vi} = 0$ и при отсутствии преаэрации $C_{sv} = 0$.

Для решения модели выбиралась наиболее адекватная модель биохимической кинетики с определением соответствующих скоростей потребления субстрата R_L , роста биомассы R_X и потребления кислорода R_C .

В структуре модели модуль биохимической кинетики является базовым и предлагает расчет процесса очистки по множеству математических моделей биохимической кинетики, условно разделенных на 2 группы: типа «Моно» и фиксированного порядка. Для идентификации констант моделей и определения наиболее адекватной модели биохимической кинетики использовался следующий обобщенный критерий:

$$S = \sum_{i=1}^n (X_i^{\text{эксп}} - X_i^{\text{расч}})^2 + \sum_{i=1}^n (L_i^{\text{эксп}} - L_i^{\text{расч}})^2 \quad (3.49)$$

На основе полученной модели разработан программный комплекс - имитатор, состоящий из двух подсистем: моделирующая программа процесса водоочистки и моделирующая программа системы управления.

Разработка такого комплекса позволила провести сравнительный анализ процесса биологической очистки сточных вод нефтехимических предприятиях: ООО «Бухарском нефтеперерабатывающем заводе» и ООО «Ферганском нефтеперерабатывающем заводе». Аэротенки очистных сооружений этих предприятий работают в режиме равномерно - рассредоточенной подачи сточной воды и сосредоточенной подачи активного ила, им соответствует ячеечная модель структуры потоков. Число ячеек определялось количеством точек ввода сточной воды.

Проведение имитационных экспериментов с использованием программного комплекса позволило получить адекватную модель процесса биологической очистки сточных вод на ООО «БНПЗ» (рис. 3.7). На имитационной модели была проанализирована работа системы очистки в режимах нормальной эксплуатации и в режиме залпового сброса. Проверка работоспособности комплекса показала достаточно хорошую близость расчетных и экспериментальных данных (рис. 3.7). Относительная погрешность расчета составила 3%.

С точки зрения практики биологических очистных сооружений определяющей является экспертная роль компьютерного комплекса по анализу экстремальных ситуаций, а также по обеспечению экономичной эксплуатации оборудования в номинальных режимах. Так, для промышленных систем аэрации, получены оптимальные значения расхода воздуха (в 2-2,5 раза ниже существующих), позволяющие значительно снизить энергозатраты при сохранении качества очищенной воды [44].

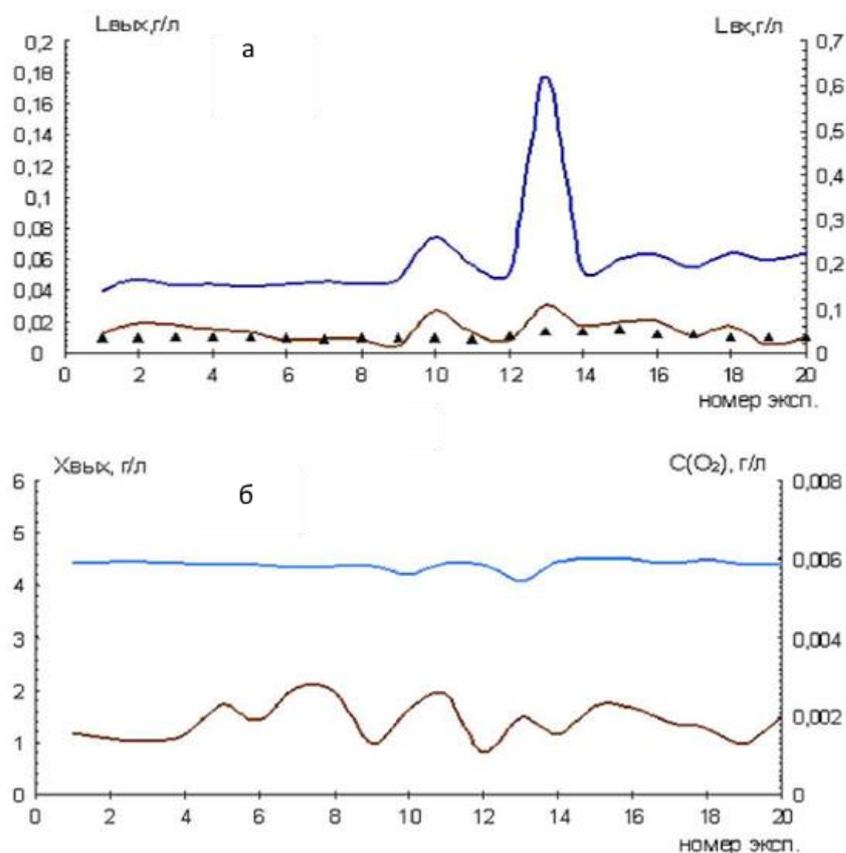


Рис. 3.7. - Динамика БПК поступающей и очищенной воды (а), концентрации кислорода и дозы ила (б); ▲ - экспериментальные данные.

Применение имитационной модели позволило наиболее точно определить параметры работы сооружений с предложенной технологией, включая не только качество очищенной воды, но и расходы воздуха, количество избыточного ила, расходы рециркуляционных потоков для условий конкретного объекта (таблица 3.1).

Таблица 3.1.

Показатели	ООО «БНПЗ»		ООО «ФНПЗ»	
	Экспл.	Реком.	Экспл.	Реком.
Концентрация активного ила, кг/м ³	2	1,5 - 3	1,3 - 3	2-3
Расход воздуха на аэрацию, тыс. м ³ /ч	3 - 5	3,2	3,2	2
Концентрация растворенного кислорода, г/м ³	6	5 - 8	5 - 8	4 - 8
Концентрация рециркулирующего активного ила, кг/м ³	4 - 5	4 - 5	4 - 10	4 - 10

3.5. Алгоритмы коррекции динамической погрешности средств измерений систем очистки и использования производственных сточных вод

Задача восстановления сигналов связана с общей проблемой искажений и коррекции в измерительных и преобразующих устройствах. Обычно к контролирующим, записывающим, измерительным и преобразующим устройствам предъявляются требования минимального динамического искажения измеряемой величины. При выполнении этого требования обеспечивается соответствие величин, восстанавливаемых и измеряемых регистрирующим устройством. Общее условие минимальных динамических искажений выполняется, когда вход и выход измерительной системы связаны между собой алгебраической зависимостью. Отсюда следует, что если уравнение, описывающее динамику контролирующего, измерительного или преобразующего устройства, является дифференциальным, то в общем случае искажения неизбежны. Это связано с тем, что решение неоднородного дифференциального уравнения представляет собой функцию, отличающуюся от правой части исходного уравнения.

Построение указанных систем позволяет получить наиболее полную информацию о работе системы автоматического управления в целом, а также необходимые сведения об управляющих воздействиях, возмущениях и координатах, относящихся к классу неизмеряемых и неконтролируемых измерительной аппаратурой сигналов [30, 134].

Задача восстановления начального состояния и входного воздействия динамической системы по результатам измерения выхода относится к классу обратных задач динамики управляемых систем [34]. Поскольку указанная задача является некорректно поставленной, для ее решения следует применять методы, развитые в соответствующей теории [115].

В работе рассматриваются вопросы формирования и построения устойчивых алгоритмов коррекции динамической погрешности средств измерений на основе регулярных методов.

Рассмотрим линейную измерительную систему, описываемую уравнениями

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k w_k, \quad x(k_0) = x^0, \quad (3.50)$$

$$y_k = C_k x_k + D_k w_k, \quad (3.51)$$

где $x \in R^n, w \in R^p, y \in R^m$; $x = x_k$ – состояние системы; x^0 – начальное состояние системы; $w_k \in L_2^p$ – входное неизмеряемое воздействие на

систему; $y_k \in L_2^m$ – выход системы; A_k, B_k, C_k, D_k – матрицы соответствующих размерностей.

Пусть

$$\Theta = R^n \times L_2^p, \quad Y = L_2^m.$$

В пространстве Θ , определим скалярное произведение вида

$$\langle \theta_1, \theta_2 \rangle_{\Theta} = \langle x_1^0, x_2^0 \rangle_{R^n} + \langle w_1, w_2 \rangle_{L_2^p},$$

которое превращает пространство Θ в гильбертово.

Соотношения (3.50), (3.51) определяют линейный оператор $F: \Theta \rightarrow Y$, который каждой паре $\theta = (x_0, w) \in \Theta$, т.е. входу системы, ставит в соответствие функцию $y \in Y$ на выходе системы. Таким образом приходим к операторному уравнению вида

$$F\theta = y, \quad \theta \in \Theta, \quad y \in Y. \quad (3.52)$$

Поставим задачу о приближенном восстановлении элемента $\theta = (x_*^0, w)$ по результатам измерений выхода y измерительной системы. В практических задачах правая часть y и элементы матрицы F , т.е. коэффициенты системы (3.52) известны лишь приближенно. В этих случаях вместо системы (3.52) используется другая система

$$F_h \theta = y_{\delta}, \quad (3.53)$$

такая, что $\|F_h - F\| \leq h$, $\|y_{\delta} - y\| \leq \delta$. Таким образом, приближенные данные характеризуются набором F_h, y_{δ}, η , где $\eta = \{\delta, h\}$ – вектор погрешности.

При решении уравнения (3.53), как правило, нарушаются условия устойчивости решения, связанные с плохой обусловленностью матрицы F_h . Отмеченные обстоятельства приводят к необходимости применения методов регуляризации.

Запишем выражение для сглаживающего функционала А.Н. Тихонова

$$M^{\alpha}[\theta_{\eta}^{\alpha}] = \|F_h \theta_{\eta}^{\alpha} - y_{\delta}\|_{Y^2} + \alpha \|\theta_{\eta}^{\alpha}\|_{\Theta^2},$$

где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации.

Введем в рассмотрение следующие функции:

$$\begin{aligned}\gamma_\eta(\alpha) &= \|\theta_\eta^\alpha\|_{\Theta^2}, \\ \beta_\eta(\alpha) &= \|F_h \theta_\eta^\alpha - y_\delta\|_{Y^2}, \\ \rho_\eta(\alpha) &= \beta_\eta(\alpha) - \left(\delta + h\sqrt{\gamma_\eta(\alpha)}\right)^2 - \mu_\eta^2.\end{aligned}$$

Здесь θ_η^α – экстремаль функционала А.Н. Тихонова $M^\alpha[\theta]$ при фиксированном $\alpha > 0$. Функции $\gamma_\eta(\alpha)$, $\beta_\eta(\alpha)$, $\rho_\eta(\alpha)$ монотонны и непрерывны как функции α в области $\alpha > 0$, $\mu_\eta = \inf_{\theta \in D} \|F_h \theta - y_\delta\|_Y$ – мера несовместимости μ_η уравнения (3.53) с приближенными данными на множестве $D \in \Theta$.

Решение уравнения (3.53) на основе метода регуляризации А. Н. Тихонова дается формулой [96]

$$\theta_\alpha = (\alpha I + F_h^T F_h)^{-1} F_h^T y_\delta = g_\alpha(F_h^T F_h) F_h^T y_\delta,$$

где $g_\alpha(\lambda) = (\alpha + \lambda)^{-1}$, $\alpha > 0$, $0 \leq \lambda < \infty$ – порождающая система функций для метода А. Н. Тихонова.

Будем полагать, что выполнено естественное условие

$$\|y_\delta\|^2 > \delta^2 + \mu_\eta^2. \quad (3.54)$$

Функция обобщенной невязки $\rho_\eta(\alpha)$ имеет следующие предельные значения на концах сегмента

$$\begin{aligned}\lim_{\alpha \rightarrow +\infty} \rho_\eta(\alpha) &= \|y_\delta\|_U^2 - \delta^2 - \mu_\eta^2, \\ \overline{\lim}_{\alpha \rightarrow 0+0} \rho_\eta(\alpha) &= -\delta^2.\end{aligned}$$

Таким образом, при выполнении условия (3.54) уравнение $\rho_\eta(\alpha) = 0$ имеет в области $\alpha > 0$ корень $\alpha^*(\eta)$, причем элемент $\theta_\eta^{\alpha^*(\eta)}$ определен единственным образом.

Если же числа h и δ неизвестны или их вычисление сопряжено со значительными трудностями, то параметр регуляризации α целесообразно определять на основе способа квазиоптимальности

$$\|\theta^{(\alpha_{i+1})} - \theta^{(\alpha_i)}\| = \min, \quad \alpha_{i+1} = \zeta \alpha_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad 0 < \zeta < 1.$$

В условиях отсутствия априорной информации об уровне погрешности исходных данных уравнения (3.53) также весьма эффективными оказываются численные схемы выбора параметра регуляризации с применением быстро сходящихся итерационных методов решения уравнений типа метода касательных Ньютона [19].

При построении приближенного решения уравнения (3.53) в случае обратимого оператора F_h большую роль также играют разнообразные итерационные методы [8, 11]. Эти методы могут быть как линейными, когда для перехода к следующему итерационному приближению требуется применить некоторый линейный оператор к одному или нескольким предыдущим приближениям, так и нелинейными, когда оператор перехода нелинейный. Известно [11], что обычно употребляемые линейные итерационные методы могут породить аппроксимации и в случае необратимого оператора F_h . Снабженные подходящим правилом останова $r(\delta, h)$ эти итерационные процессы, в свою очередь, порождают регуляризующие алгоритмы для задачи (3.53).

С этой точки зрения более удобным является итерированный вариант метода регуляризации А.Н. Тихонова [96]:

$$\alpha\theta_{r,\alpha} + F_h^T F_h \theta_{r,\alpha} = \alpha\theta_{r-1,\alpha} + F_h^T y_\delta \quad (r=1,\dots,m). \quad (3.55)$$

Решение уравнения (3.55) дается – формулой

$$\theta_{m,\alpha} = (I - F_h^T F_h g_{m,\alpha}(F_h^T F_h))\theta_0 + g_{m,\alpha}(F_h^T F_h)F_h^T y_\delta, \quad (3.56)$$

где θ_0 – начальное приближение, а $g_{m,\alpha}(\lambda)$ – порождающая система функций для итерированного варианта (3.55) метода А.Н. Тихонова, определяемая выражением

$$g_{m,\alpha}(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\alpha + \lambda} \right)^m \right], \quad 0 \leq \lambda < \infty.$$

Параметр $r = r(\delta, h)$ в приближении (3.56) следует выбирать таким образом [11], чтобы

$$r(\delta, h) \rightarrow \infty, \quad (\delta + h)^2 r(\delta, h) \rightarrow 0, \quad \text{при } \delta \rightarrow 0, \quad h \rightarrow 0.$$

Тогда $\theta_{r(\delta,h)} \rightarrow \theta_*$ при $\delta \rightarrow 0, h \rightarrow 0$ где θ_* – решение уравнения $F_h^T F_h \theta_* = F_h^T y$.

Здесь целесообразно использовать следующее правило останова итерационного процесса:

Задаются числа $b_1 > 1$ и $b_2 \geq b_1$. Если $\|F_h \theta_0 - y_\delta\| \leq b_2(\delta + \|\theta_0\|h)$, то положим $r = 0$ и за приближенное решение примем u_0 . В противном случае выберем $r > 0$, при котором $b_1(\delta + \|\theta_r\|h) \leq \|F_h \theta_r - y_\delta\| \leq b_2(\delta + \|\theta_r\|h)$. Если при $r \in [0, d/(\delta + h)^2]$ невязка не достигла уровня $\|F_h \theta_r - y_\delta\| \leq b_2(\delta + \|\theta_r\|h)$, то поиск r прекращается и выбирается $r = d/(\delta + h)^2$.

Для вычисления искомого вектора θ также могут быть использованы, например, и другие итерационные схемы вида [21]

$$\begin{aligned} \varepsilon \theta_r + F_h^T F_h \theta_r &= \varepsilon \theta_{r-1} + F_h^T y^\delta, \quad \varepsilon > 0, \quad r=1,2,\dots, \\ (\alpha I + F_h^T F_h) \theta_r &= \alpha \theta_{r-1} + F_h^T y^\delta, \quad r=1,2,\dots, \end{aligned}$$

которые примыкают к регулярным итерационным алгоритмам.

Можно показать [124], что для рассматриваемой задачи весьма эффективным оказывается нелинейный итерационный алгоритм вида:

$$\begin{aligned} \theta_{r+1} &= \theta_r - (\varepsilon_r I + F_h^T F_h)^{-1} F_h^T (F_h \theta_r - f_\delta), \quad \theta_0 = 0, \\ \varepsilon_r &= \begin{cases} \bar{\varepsilon}_r = \frac{\|F_h^T (F_h \theta_r - f_\delta)\|^2}{\|F_h \theta_r - f_\delta\|^2}, & \bar{\varepsilon}_r \geq \psi(\delta, h) > 0, \\ \psi(\delta, h), & \bar{\varepsilon}_r < \psi(\delta, h), \end{cases} \end{aligned} \quad (3.57)$$

где $\Psi(\delta, h)$ – заданная пороговая функция такая, что

$$\lim_{\delta \rightarrow 0, h \rightarrow 0} \Psi(\delta, h) = 0, \quad \Psi(0) = 0.$$

Тогда, следуя теории итерационных методов [11,21,124], можно показать, что если

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow 0, h \rightarrow 0 \\ r \rightarrow \infty}} (\delta + h \|\hat{\theta}_\varepsilon\|) \sum_{j=0}^k (\varepsilon_j)^{-1/2} = 0,$$

то

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow 0, h \rightarrow 0 \\ r \rightarrow \infty}} \|\theta_{r+1} - \hat{\theta}_r\| = 0, \quad \hat{\theta} \perp \ker F_h^T F_h.$$

Итерационный процесс (3.57), оставаясь нелинейным на первых итерациях, сходится быстрее, чем ряд известных итерационных алгоритмов.

Приведенные алгоритмы позволяют получить наиболее полную информацию о работе систем автоматического управления различными технологическими объектами в целом, а также необходимые сведения об управляющих воздействиях, возмущениях и координатах, относящихся к

классу неизмеряемых и неконтролируемых измерительной аппаратурой сигналов и могут быть использованы в информационно-измерительных системах обработки результатов наблюдений за состоянием динамической системы.

3.6. Алгоритмы динамической фильтрации с учетом инерционности измерительного устройства систем очистки и использования производственных сточных вод

В прикладных задачах часто возникают вопросы синтеза информационно-измерительных систем обработки результатов наблюдений за состоянием динамической системы. Подобные задачи возникают на различных этапах проектирования и наиболее важное значение приобретают при обработке результатов измерений экспериментальных данных.

Рассмотрим вопросы формирования процедуры построения моделей состояния динамических систем и алгоритмов фильтрации с учетом инерционности измерительного устройства [111]. Такие случаи наиболее часто возникают в прикладных задачах, когда наблюдаемый сигнал контролируется инерционным измерительным устройством и подвержен воздействию шума измерения. В этих случаях нарушаются общие условия фильтрации, что приводит к необходимости применения способов преобразования векторно-матричных уравнений, описывающих динамику исходной динамической системы и измерительного устройства. Для соблюдения общих условий фильтрации в рассматриваемом случае составляется эквивалентная расширенная динамическая система, содержащая случайный процесс с коррелированными значениями [45]. Таким образом, в теории динамической фильтрации и прогнозирования Калмана-Бьюси в частности, представляют гауссовские марковские случайные процессы и случайные последовательности. Практическое использование гауссовских марковских случайных процессов определяется рядом факторов, к которым в первую очередь можно отнести возможность аппроксимации с высокой точностью реальных случайных процессов гауссовскими марковскими процессами; возможность сведения методом линейных преобразований произвольного гауссовского случайного процесса с конечным числом производных к эквивалентному гауссовскому марковскому случайному процессу; целесообразность

аппроксимации негауссовских случайных процессов гауссовскими марковскими случайными процессами [117, 119]. Указанные факторы, определяющие широкую распространенность гауссовских марковских случайных процессов, являются наиболее важными в прикладных вопросах построения моделей линейных динамических систем.

Статистическая обработка информации, основанная на теории оптимальной фильтрации Калмана–Бьюси, предполагает техническую реализацию на базе цифровых ЭВМ. В связи с этим большое практическое значение приобретают алгоритмы фильтрации, использующие рекуррентные методы обработки статистической информации. Следовательно, особый интерес в прикладных задачах имеет дискретная оптимальная фильтрация [123]. Математическое описание дискретных фильтров проводится в рамках разностных или рекуррентных уравнении, которые тесно связаны с дифференциальными уравнениями, составляющими основу классического исследования непрерывных процессов. Разностные уравнения, позволяющие исследовать последовательность состояний дискретных систем, легко реализуются с помощью цифровых ЭВМ, причем дискретный фильтр Калмана определяет только алгоритм обработки данных, предназначенных для реализации на ЭВМ, и не характеризует тип ЭВМ и необходимое математическое обеспечение.

В работе рассматриваются вопросы формирования и построения устойчивых алгоритмов фильтрации с учетом инерционности измерительного устройства на основе динамических фильтров калмановского типа.

Рассмотрим задачу динамического оценивания:

$$x_{i+1} = Ax_i + \Gamma w_i, \quad i = 0, 1, \dots, k-1,$$

где x_i - n -вектор состояния, w_i - r -мерная гауссовская чисто случайная последовательность с нулевыми средними и матрицей ковариаций Q .

Измерения описываются уравнением

$$z_i = Hx_i + v_i, \quad i = 0, 1, \dots, k, \quad (3.58)$$

где z_i - p -мерный вектор измерения, v_i - p -мерная гауссовская марковская последовательность, которую можно получить с помощью многошагового формирующего фильтра

$$v_{i+1} = \Psi v_i + \xi_i.$$

Здесь ξ_i – p -мерная гауссовская чисто случайная последовательность с нулевыми средними и матрицей ковариаций Q^* .

На основе принципа расширения моделей рассматриваемую задачу оценивания можно привести к виду

$$y_{i+1} = A^\alpha y_i + \Gamma^\alpha \eta_i, \quad (3.59)$$

$$z_i = H^\alpha y_i, \quad (3.60)$$

где

$$A^\alpha = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & \Psi \end{bmatrix}, \quad \Gamma^\alpha = \begin{bmatrix} \Gamma & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix}, \quad \eta_i = \begin{bmatrix} w_i \\ \xi_i \end{bmatrix}, \quad H^\alpha = [H \mid E].$$

$$y_i = \begin{bmatrix} x_i \\ v_i \end{bmatrix}.$$

Из уравнений (3.59) и (3.60) видно, что измерения (3.58) по отношению к вектору y_i являются «точными», т.е. они не содержат чисто случайного шума.

Таким образом, особенностью рассматриваемой задачи фильтрации является предположение о коррелированности помехи измерений v_i . В этом случае при дополнительном предположении о гауссовости $x_0, \{w_i\}, \{v_i\}$ имеем [117, 123]:

$$\hat{x}_k = E\{x_k | z_0, z_1, \dots, z_k\}.$$

Оценка \hat{x}_k имеет следующие свойства:

1. несмещенность:

$$E\{\hat{x}_k\} = x_k;$$

2. минимальность дисперсий:

$$\text{tr}E\{(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T\} = \min_{\tilde{x}_k} \text{tr}E\{(\tilde{x}_k - x_k)(\tilde{x}_k - x_k)^T\},$$

где \tilde{x}_k – любая несмещенная, линейная по z_0, z_1, \dots, z_k оценка для x_k ; tr – след матрицы. Эти свойства характеризует \hat{x}_k как наилучшую линейную несмещенную оценку.

Предположим, что $(k+1)$ -ое наблюдение осуществляется без ошибок. Тогда

$$z_{k+1} = H_{k+1}x_{k+1}. \quad (3.61)$$

Соотношение (3.61) можно интерпретировать следующим образом

$$z_{k+1} = H_{k+1}x_{k+1} + v_{k+1},$$

где v_{k+1} – случайное возмущение, имеющее нулевое среднее и

нулевую матрицу ковариаций.

Тогда на основе известных уравнений фильтра Калмана [117, 119] можно записать следующие уравнения многошагового фильтра для расширенной системы (3.59) и (3.60):

$$\hat{y}_k = A^\alpha \hat{y}_{k-1} + K_k^\alpha (z_k - H^\alpha A^\alpha \hat{y}_{k-1}), \quad (3.62)$$

$$K_k^\alpha = M_k^\alpha (H^\alpha)^T \left[H^\alpha M_k^\alpha (H^\alpha)^T \right]^{-1}, \quad (3.63)$$

$$M_{k+1}^\alpha = A^\alpha P_k^\alpha (A^\alpha)^T + \Gamma^\alpha Q^\alpha (\Gamma^\alpha)^T, \quad (3.64)$$

$$P_k^\alpha = M_k^\alpha - M_k^\alpha (H^\alpha)^T \left[H^\alpha M_k^\alpha (H^\alpha)^T \right]^{-1} H^\alpha M_k^\alpha, \quad (3.65)$$

где

$$Q^\alpha = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & Q^* \end{bmatrix}.$$

Анализируя соотношения (3.63) и (3.65) можно видеть, что вычисления по этим выражениям обладают низкой вычислительной устойчивостью. Это обусловлено тем, что матрица $H^\alpha M_k^\alpha (H^\alpha)^T$ может быть плохо обусловленной, и вследствие этого вычисление матрицы, обратной к $H^\alpha M_k^\alpha (H^\alpha)^T$, может быть весьма неточным. По существу, это связано с тем, что в фильтре, описываемым выражениями (3.62) – (3.65) имеет место случай, когда измерения осуществляются точно, т.е. без ошибок.

Этих трудностей можно избежать, если использовать следующий динамический фильтр [117]:

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_k (\zeta_k - H^* \bar{x}_k), \quad (3.66)$$

$$\bar{x}_{k+1} = A \hat{x}_k + D (\zeta_k - H^* \hat{x}_k), \quad (3.67)$$

$$K_k = P_k (H^*)^T R^{-1}, \quad (3.68)$$

$$P_k = M_k - M_k (H^*)^T \left(H^* M_k (H^*)^T + R \right)^{-1} H^* M_k, \quad (3.69)$$

$$M_{k+1} = (A - D H^*) P_k (A - D H^*)^T + \Gamma Q \Gamma^T - D R D^T, \quad (3.70)$$

где R , D и S определяются уравнениями.

$$R = H \Gamma Q_k \Gamma^T H^T + Q^*,$$

$$D = \Gamma S R^{-1},$$

$$S = Q \Gamma^T H^T,$$

$$\zeta_k = z_{k+1} - \Psi z_k$$

или

$$\zeta_k = H^* x_k + \varepsilon_k,$$

где

$$H^* \equiv H A - \Psi H \quad \text{и} \quad \varepsilon_k \equiv H \Gamma w_k + \zeta_k.$$

Однако в этой задаче имеются две особенности: выбранное измерение ζ_k по отношению к действительному измерению z_k запаздывает на один шаг; шумы в системе и измерениях коррелированы. Размерность этого фильтра n , тогда как размерность фильтра (3.62) – (3.65) для расширенного вектора состояния равна $(n+p)$. Измерения z_k можно рассматривать как p точных измерений, содержащих $(n+p)$ переменных x_k и v_k .

В случае, если в уравнениях (3.68) и (3.69) матрица $R \equiv H \Gamma Q \Gamma^T H^T + Q^*$ невырожденная, процесс вычисления компонент K_k и D не является плохо обусловленным. В случае вырожденной R целесообразно использовать фильтр вида [117]:

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_k (\zeta_k - H^* \bar{x}_k),$$

$$\bar{x}_{k+1} = A \hat{x}_k + \Gamma S [H^* M_k (H^*)^T + R]^{-1} (\zeta_k - H^* \bar{x}_k), \quad (3.71)$$

$$K_k = M_k (H^*)^T [H^* M_k (H^*)^T + R]^{-1}, \quad (3.72)$$

$$P_k = (E - K_k H^*) M_k (E - K_k H^*) + K_k R K_k^T, \quad (3.73)$$

$$M_{k+1} = A P_k A^T + \Gamma Q \Gamma^T - \Gamma S [H^* M_k (H^*)^T + R]^{-1} S^T \Gamma^T - A K_k S^T \Gamma^T - \Gamma S K_k^T A^T. \quad (3.74)$$

Для обеспечения устойчивости процедуры фильтрации оказывается желательным вместо уравнений (3.63), (3.65) и (3.71), (3.72) и (3.74) использовать соответственно следующие соотношения:

$$K_k^\alpha = M_k^\alpha (H^\alpha)^T \cdot g_\alpha^a(C_k),$$

$$P_k^\alpha = M_k^\alpha - M_k^\alpha (H^\alpha)^T \cdot g_\alpha^a(C_k) \cdot H^\alpha M_k^\alpha,$$

$$g_\alpha^a(C_k) = (C_k + \alpha I)^{-1}, \quad C_k = [H^\alpha M_k^\alpha (H^\alpha)^T];$$

$$\bar{x}_{k+1} = A \hat{x}_k + \Gamma S \cdot g_\alpha(C'_k) (\zeta_k - H^* \bar{x}_k),$$

$$K_k = M_k (H^*)^T \cdot g_\alpha(C'_k),$$

$$M_{k+1} = A P_k A^T + \Gamma Q \Gamma^T - \Gamma S \cdot g_\alpha(C'_k) S^T \Gamma^T - A K_k S^T \Gamma^T - \Gamma S K_k^T A^T,$$

$$g_\alpha(C'_k) = (C'_k + \alpha I)^{-1}, \quad C'_k = [H^* M_k (H^*)^T + R].$$

где $g_\alpha^a(C_k)$ и $g_\alpha(C'_k)$ – порождающие системы функций для метода регуляризации, α – параметр регуляризации, I – единичная матрица. Здесь параметр регуляризации α целесообразно выбирать на основе

способа модельных примеров или моделирования [30].

Если матрица $(H^\alpha M_k^\alpha (H^\alpha)^T)^{-1}$ не существует, то это означает, что в (3.61) входят некоторые уравнения (а именно $p-r$ уравнений, r - ранг матрицы H_{k+1}), линейно зависящие от r остальных. Поэтому эти уравнения можно исключить из (3.61). После исключения вместо z_{k+1} получаем z_{k+1}^* - r -мерный вектор, и теперь можно полагать существующей подобную обратную матрицу в новой задаче.

Для реализации алгоритмов устойчивой фильтрации (3.62)-(3.65) и (3.71)-(3.74) также оказывается целесообразным использовать концепции сингулярного разложения [11, 15]. Сингулярное разложение позволяет найти ортогональные базисы различных векторных пространств разлагаемой матрицы. При этом используются разные свойства сингулярного разложения, например, способность показывать ранг матрицы, приближать матрицы данного ранга, вычислять обратные и псевдообратные матрицы.

Рассмотрим процедуру устойчивой фильтрации на основе уравнений (3.62) – (3.65) с использованном ортогональной матрицы s_k [22]. Приведем C_k к диагональному виду

$$s_k^T C_k s_k = \Lambda_k ,$$

$$\Lambda_k = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p, 0, \dots, 0) = \begin{pmatrix} \tilde{\Lambda} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Исходя из матрицы Λ_k можно написать

$$z_{k,1}^{(1)} = H_{k,1}^{(1)} x_k + v_k^{(1)} ,$$

$$z_{k,2}^{(1)} = H_{k,2}^{(1)} x_k ,$$

где $z_{k,i}^{(1)}$, $H_{k,i}^{(1)}$ ($i = 1, 2$) определяются на основе уравнений

$$z_k^{(1)} = s_k^T z_k = \begin{pmatrix} z_{k,1}^{(1)} \\ z_{k,2}^{(1)} \end{pmatrix}$$

и

$$H_k^{(1)} = s_k^T H_k = \begin{pmatrix} H_{k,1}^{(1)} \\ H_{k,2}^{(1)} \end{pmatrix}$$

соответственно.

Принимая во внимание, что $s_k^T C_k s_k = \Lambda_k$, можно написать $C_k = s_k \Lambda_k s_k^T = s_{k,1} \tilde{\Lambda} s_{k,1}^T$. Тогда $C_k^+ = s_{k,1} \tilde{\Lambda}^{-1} s_{k,1}^T$ что удовлетворяет всем следующим уравнениям, которые единственно определяют псевдообратную к C_k матрицу:

$$\begin{aligned}
C_k^+ C_k &= I, \\
C_k C_k^+ &= I, \\
C_k^+ C_k C_k^+ &= C_k^+, \\
C_k C_k^+ C_k &= C_k.
\end{aligned}$$

Таким образом, можно прийти к оценке вида:

$$\tilde{x}_i = F_i^{(1)} \tilde{x}_{i-1} + F_i^{(2)} z_i, \quad F_i = \left(\underbrace{F_i^{(1)}}_n, \underbrace{F_i^{(2)}}_p \right),$$

которая зависит от \tilde{x}_{i-1} и z_i .

Приведенные алгоритмы позволяют повысить вычислительную устойчивость алгоритмов динамической фильтрации с учетом инерционности измерительного устройства и могут быть использованы в информационно-измерительных системах обработки результатов наблюдений за состоянием динамической системы.

3.7. Алгоритмы сглаживания измерительной информации в системах очистки и использования сточных вод

Однако многие датчики и приборы обладают и существенными недостатками, связанными с низкой точностью измерений и высоким уровнем внутренних шумов. Погрешности датчиков разделяются на систематические и случайные [46, 82]. Систематические погрешности, как правило, оцениваются при калибровке и компенсируются в процессе функционирования системы.

Для снижения уровня случайных погрешностей датчиков будем применять алгоритмы сглаживания, построенные на основе фильтра Калмана:

Модели состояния датчика и наблюдений запишем в виде:

$$x(j+1) = \Phi(j+1, j)x(j) + \Gamma(j)w(j). \tag{3.75}$$

$$z(j) = H(j)x(j) + v(j). \tag{3.76}$$

Априорные данные примем в виде:

$$\begin{aligned}
E\{w(j)\} &= 0, \quad E\{v(j)\} = 0, \quad E\{x(0)\} = \mu_x(0), \\
\text{cov}\{w(j), w(k)\} &= V_w(j)\delta_K(j-k),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{cov}\{v(j), v(k)\} &= V_v(j)\delta_K(j-k), \\ \text{cov}\{w(j), v(k)\} &= \text{cov}\{x(0), w(k)\} = \text{cov}\{x(0), v(k)\} = 0, \\ \text{var}\{x(0)\} &= V_{\hat{x}}(0).\end{aligned}$$

Тогда алгоритмы сглаживания на основе фильтра Калмана можно записать в виде:

$$\hat{x}(j) = \Phi(j, j-1)\hat{x}(j-1) + K(j)[z(j) - H(j)\Phi(j, j-1)\hat{x}(j-1)]. \quad (3.77)$$

$$K(j) = V_{\hat{x}}(j|j-1)H^T(j)[H(j)V_{\hat{x}}(j|j-1)H^T(j) + V_v(j)]^{-1} = V_{\hat{x}}(j)H^T(j)V_v^{-1}(j). \quad (3.78)$$

$$V_{\hat{x}}(j+1|j) = \Phi(j+1, j)V_{\hat{x}}(j)\Phi^T(j+1, j) + \Gamma(j)V_w(j)\Gamma^T(j). \quad (3.79)$$

$$V_{\hat{x}}(j) = [I - K(j)H(j)]V_{\hat{x}}(j|j-1). \quad (3.80)$$

$$\hat{x}(0|0) = \hat{x}(0) = \mu_x(0), \quad V_{\hat{x}}(0|0) = V_{\hat{x}}(0) = V_x(0).$$

$$\hat{x}(k|N) = \hat{x}(k) + A(k)[\hat{x}(k+1|N) - \Phi(k+1, k)\hat{x}(k)]. \quad (3.81)$$

$$A(k) = V_{\hat{x}}(k)\Phi^T(k+1, k)V_{\hat{x}}^{-1}(k+1|k). \quad (3.82)$$

$$V_{\hat{x}}(k|N) = V_{\hat{x}}(k) + A(k)[V_{\hat{x}}(k+1|N) - V_{\hat{x}}(k+1|k)]A^T(k). \quad (3.83)$$

$$\hat{x}(N|N) = \hat{x}(N); \quad V_{\hat{x}}(N|N) = V_{\hat{x}}(N).$$

Классический фильтр Калмана позволяет получать оптимальные оценки случайного процесса при условии стационарности измерительных шумов или наличия априорной информации об изменении их интенсивности. Получить и использовать достоверную априорную информацию об изменении интенсивности шумов датчиков достаточно сложно, так как она зависит от случайных условий функционирования датчика и от нестабильности шумовых характеристик различных датчиков.

Устранить этот недостаток можно за счет использования фильтров сглаживания, адаптивных к изменению интенсивности шумов измерений. Традиционный подход к построению адаптивных алгоритмов на основе фильтра Калмана заключается в расширении вектора состояния путем включения в него априорно неизвестной интенсивности шума измерения. При таком подходе уравнения для ковариационных матриц ошибок оценивания (уравнения Риккати) становятся зависимыми от результатов измерений и должны интегрироваться совместно с уравнениями для оценок вектора состояния. Это приводит к увеличению вычислительных затрат при реализации фильтра.

С целью снижения вычислительных затрат на адаптацию предлагается использовать алгоритм сглаживания, имеющий структуру фильтра Калмана и отличающийся предварительной статистической обработкой невязок измерений. Предлагаемый алгоритм базируется на

результатах работы [108], в которой показано, что матрица коэффициентов фильтра Калмана может быть получена на основе информации, содержащейся в ковариационных матрицах обновляющей последовательности измерений. Алгоритмы вычисления коэффициентов фильтра, полученные в работе [108], усовершенствованы тем, что предварительная статистическая обработка невязок измерений осуществляется на скользящем интервале времени. За счет этого обеспечивается более высокая точность определения коэффициентов фильтра.

Адаптивные фильтры сглаживания первого порядка предназначены для обработки скалярных сигналов датчиков информации с использованием априорной модели сигнала в виде стохастического дифференциального (разностного) уравнения первого порядка.

Пусть на вход датчика поступает дискретный процесс $x(k)$, априорная модель которого описывается уравнением:

$$x(k+1) = \alpha x(k) + \xi(k+1), \quad (3.84)$$

где $\alpha = 1 - \Delta t (T_x)^{-1}$, ($\Delta t \leq T_x$); $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – шаг обновления оценок; T_x – постоянная времени формирующего фильтра процесса $x(k)$; $\xi(k+1)$ – дискретный центрированный случайный процесс, значения которого на соседних шагах счета не коррелированы $M[\xi(k+1)\xi(k)] = 0$.

Датчиком осуществляется измерение значений $x(k)$ со случайной ошибкой $\eta(k)$:

$$x^*(k) = x(k) + \eta(k). \quad (3.85)$$

Предполагается, что систематическая составляющая погрешности $\Delta x(k)$ отсутствует (либо компенсируется на выходе датчика). Случайная составляющая $\eta(k)$ представляет собой дискретный нестационарный центрированный случайный процесс, значения которого на соседних шагах счета не коррелированы между собой ($M[\eta(k+1)\eta(k)] = 0$).

Для дискретного процесса (3.84) с учетом соотношения (3.85) требуется получить алгоритм фильтрации калмановской структуры, в котором коэффициент преобразования $k_\phi(k)$ адаптируется к изменению интенсивности процесса $\eta(k)$.

В работе [108] показано, что предварительная статистическая обработка невязок измерений позволяет получать коэффициенты усиления фильтра, зависящие от изменения интенсивности шумов измерения и взаимной ковариации невязок на двух соседних шагах счета. Таким образом, для определения квазиоптимальных значений

коэффициентов фильтра отпадает необходимость в решении уравнений Риккати, а также в наличии априорной информации об интенсивностях, порождающих и измерительных шумов системы.

Для уравнения (3.84) квазиоптимальная оценка процесса $\hat{x}(k)$ может быть получена на основе рекуррентного соотношения:

$$\hat{x}(k+1) = \alpha\hat{x}(k) + k_\phi[x^*(k+1) - \alpha\hat{x}(k)], \quad (3.86)$$

где $k_\phi(k)$ – коэффициент преобразования фильтра; $x^*(k+1)$ – измеренное значение сигнала датчика на шаге $(k+1)$.

Для определения коэффициента преобразования фильтра $k_\phi(k)$ необходимо на каждом шаге счета вычислять оценки $\hat{M}[v(k+1)v(k)]$ и $\hat{M}[v^2(k+1)]$, где $v(k+1) = x^*(k+1) - \alpha\hat{x}(k)$ – невязка измерения в момент времени t_{k+1} . Оценки величин $\hat{M}[v(k+1)v(k)]$ и $\hat{M}[v^2(k+1)]$ находятся путем осреднения соответствующих произведений на скользящем интервале T_0 , содержащем N тактов вычисления оценок величины $x(k)$: $T_0 = N\Delta t$. При этом для удовлетворительной работы алгоритма достаточно принять $N = 50 \div 100$.

Вычисление коэффициента $k_\phi(k)$ производится по следующему алгоритму:

1. На каждом шаге отсчета k формируется N – мерный вектор Q , элементами которого являются невязки измерений, вычисленные на предыдущих $N-1$ шагах обновления оценок и на данном шаге:

$$Q^T = \{q_1, q_2, \dots, q_n\} = \{v(k), v(k-1), \dots, v(k-N+1)\}.$$

2. Кроме этого, на каждом шаге счета запоминается вектор P , сформированный на предыдущем шаге:

$$P^T = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} = \{v(k-1), v(k-2), \dots, v(k-N)\}.$$

3. Вычисляются скалярные произведения:

$$S_1 = Q^T Q; \quad S_2 = Q^T P.$$

4. В качестве оценок математических ожиданий ковариаций невязок принимаются:

$$\hat{M}[v^2(k+1)] \approx \frac{S_1}{N}; \quad \hat{M}[v(k+1)v(k)] \approx \frac{S_2}{N}$$

Коэффициент преобразования фильтра $k_\phi(k)$ вычисляется по формуле:

$$k_\phi = \frac{|\hat{M}[v(k+1)v(k)]|}{\hat{M}[v^2(k+1)]} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (3.87)$$

Приведенные алгоритмы позволяют получить и использовать достоверную априорную информацию об изменении интенсивности шумов, и исключить влияние нестабильности шумовых характеристик различных датчиков.

3.8. Алгоритмы оценивания параметров в многоканальных измерительных системах очистки и использования производственных сточных вод

Во многих прикладных задачах, связанных с контролем и управлением совокупностью динамических объектов, возникает необходимость в проведении множественной идентификации состояний и измерений состояния этих объектов. Процесс наблюдения за множеством объектов осуществляется с помощью многоканальных обзорных информационно-измерительных систем (ИИС). При этом очень часто такого рода обзорные ИИС (оптические, оптико-электронные, акустические, тепловые, электромагнитные и др.), регистрируя в последовательные моменты времени одновременно измерения состояния нескольких объектов, не фиксируют соответствие между измерениями и наблюдаемыми объектами. Совокупность измерений, отвечающая каждому отдельному наблюдению, может содержать также некоторое число ложных измерений шумового происхождения. Кроме того, в наблюдениях возможны случайные пропуски измерений от объектов.

Таким образом, измерительная информация, поступающая от обзорных ИИС, наряду с обычной неточностью измерений состояния контролируемых объектов содержит дополнительную неопределенность, связанную с неизвестным происхождением отдельных измерений каждого наблюдения. Эта неопределенность не позволяет непосредственно применять для идентификации совокупности объектов широко представленные в литературе «однообъектные методы» и требует использования специальных методов множественной идентификации.

Альтернативный и более общий подход к решению задачи множественного оценивания состояний не требует проведения идентификации измерений [19, 30]. В соответствии с этим подходом для коррекции оценок состояния каждого объекта после получения очередного наблюдения используются не одно, как в первом способе, а все измерения данного наблюдения, взятые с определенными весами. При этом метод оценивания состояний с предварительной идентификацией измерений оказывается одним из возможных субоптимальных вариантов метода, отвечающего данному подходу.

Точное решение любой задачи математического описания возможно при точной постановке задачи, но связи и отношения рассматриваемого процесса с другими объектами в реально существующей среде могут быть весьма сложны и многообразны, что практически невозможно математически строго описать многие процессы и объекты. Для всех математических моделей результатом эксперимента является математический объект. В математическом аспекте значительный круг прикладных задач имеет своей целью восстановление по экспериментальным данным характеристик и параметров объекта. При этом реальные системы редко исчерпывающе описываются ограниченными математическими моделями. Процесс выбора характеристик (параметров) модели из заданного класса для наилучшего описания результатов представляет собой одно из довольно общих определений понятия оценивания. На практике процесс оценивания часто удается связать с какой-нибудь количественной характеристикой качества оценивания и при выборе оценок естественно стараться минимизировать отрицательное влияние погрешностей [59, 108].

При исследовании многомерных стохастических систем возможны случаи, когда векторы случайных возмущений имеют зависимые компоненты, а их ковариации неизвестны. В таких случаях возникают две проблемы: построение оценок параметров системы в условиях неизвестных статистических характеристик векторов случайных возмущений и построение оценок ковариационных матриц. Число параметров ковариационной матрицы, подлежащих оцениванию, может быть существенно уменьшено при наложении ограничений на ее структуру [108, 117].

Рассмотрим векторную линейную параметрическую модель, описывающую многоканальную измерительную систему:

$$Y_t = X_t^T \theta + V_t, \quad (t = 1, \dots, N), \quad (3.88)$$

где $Y_t = \{y_{1t}, \dots, y_{mt}\}^T$ – вектор измерений; $X_t = \{X_{1t}, \dots, X_{mt}\}$ – известная

неспособная матрица размера $p \times m$ ($t=1, \dots, N$); $X_{it} = \{x_{i1}^t, \dots, x_{ip}^t\}^T$ – i -й столбец матрицы X_t , ($i=1, \dots, m$); $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_p\}^T$ – вектор неизвестных параметров; $V_t = \{u_{1t}, \dots, u_{mt}\}^T$ – вектор случайных коррелированных во времени ошибок измерений ($t=1, \dots, N$); N – общее число измерений; m – суммарное количество измерительных каналов.

Будем полагать, что ошибки измерений описываются векторным разностным стохастическим уравнением авторегрессии

$$V_t = \sum_{n=1}^d B_n V_{t-n} + E_t, \quad (t=1, \dots, N), \quad (3.89)$$

где $E_t = \{\varepsilon_{1t}, \dots, \varepsilon_{mt}\}^T$ – векторный дискретный белый шум, причем

$$\begin{aligned} M[E_t] &= 0, \\ M[E_n E_q^T] &= G \delta_n^q, \quad G > 0; \\ B_n &= \text{diag}\{b_{n1}, \dots, b_{nm}\} \end{aligned}$$

– диагональная матрица размера $m \times m$ с элементами $\{b_{ni}\}_{i=1}^m$ на главной диагонали.

Модель (3.89) может быть записана в координатной форме:

$$u_{it} = U_{it}^T b_i + \varepsilon_{it} \quad (i=1, \dots, m; t=1, \dots, N),$$

где

$$\begin{aligned} b_i &= \{b_{1i}, \dots, b_{di}\}^T, \\ U_{it} &= \{u_{i,t-1}; \dots; u_{i,t-d}\}^T. \end{aligned}$$

В [146] предлагается адаптивную оценку $\hat{\theta}_N^A$ вектора параметров θ вычислять на основе соотношения:

$$W_N(\hat{B}, \hat{G}_N) \hat{\theta}_N^A = H_N(\hat{B}, \hat{G}_N), \quad (3.90)$$

где

$$\begin{aligned} W_N(\hat{B}, \hat{G}_N) &= \sum_{t=1}^N X_t(\hat{B}) \hat{G}_N^{-1} X_t^T(\hat{B}), \\ H_N(\hat{B}, \hat{G}_N) &= \sum_{t=1}^N X_t(\hat{B}) \hat{G}_N^{-1} Y_t(\hat{B}), \\ X_t^T(B) &= X_t^T - \sum_{n=1}^d B_n X_{t-n}^T, \\ Y_t(B) &= Y_t - \sum_{n=1}^d B_n Y_{t-n}, \\ W_N &= \{w_{ij}^N\}_{i,j=1}^p = \sum_{t=1}^N X_t X_t^T, \\ \hat{\theta}_N &= W_N^{-1} \sum_{t=1}^N X_t Y_t, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\widehat{V}_t &= Y_t - X_t^T \theta_N, \\ \widehat{U}_{it} &= \{\widehat{u}_{i,t-1}; \dots; \widehat{u}_{i,t-d}\}^T \\ (i &= 1, \dots, m; t = 1, \dots, N), \\ \widehat{b}_i &= \left(\sum_{t=1}^N \widehat{U}_{it} \widehat{U}_{it}^T \right)^{-1} \sum_{t=1}^N \widehat{U}_{it} u_{it} \quad (i = 1, \dots, m), \quad \widehat{G}_N = N^{-1} \sum_{t=1}^N \left(\widehat{V}_t - \sum_{n=1}^d \widehat{B}_n \widehat{V}_{t-n} \right) \left(\widehat{V}_t - \sum_{n=1}^d \widehat{B}_n \widehat{V}_{t-n} \right)^T.\end{aligned}$$

Основной уязвимой вычислительной операцией при реализации рассматриваемого метода оценивания параметров векторной регрессионной модели с коррелированными ошибками измерений является процедура решения уравнения (3.90). Это обусловлено тем, что система уравнений (3.90) может быть плохо обусловленной, т.е. малым изменениям исходных данных могут отвечать большие изменения решения.

Отмеченное обстоятельство при решении уравнения (3.90) приводит к необходимости применения методов регуляризации [138, 144]. Для регуляризации решения уравнения (3.90) будем использовать регулярные итерационные методы.

Условия аппроксимации исходных данных примем в виде

$$\begin{aligned}\|W_N^{(h)}(\widehat{B}, \widehat{G}_N) - W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)\| &\leq h, \\ \|H_N^{(\delta)}(\widehat{B}, \widehat{G}_N) - H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)\| &\leq \delta,\end{aligned}$$

где $W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)$ и $H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)$ – точные значения матричного оператора и вектора правой части уравнения (3.90).

Принимая во внимание, что матричный оператор $W_N^{(h)}(\widehat{B}, \widehat{G}_N)$ является самосопряженным, для регуляризации решения уравнения (3.90) используем метод М.М.Лаврентьева [126].

В этом случае, согласно методу α – регуляризации Лаврентьева, вместо некорректного уравнения (3.90) нужно решать уравнение второго рода

$$\alpha \widehat{\theta}_{N\alpha}^A + W_N^{(h)}(\widehat{B}, \widehat{G}_N) \widehat{\theta}_{N\alpha}^A = \widetilde{H}_N^{(\delta)}(\widehat{B}, \widehat{G}_N), \quad (3.91)$$

где $\alpha > 0$ – малый параметр. Решение уравнение (3.91)

$$\widehat{\theta}_{N\alpha}^A = (\alpha E + W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N))^{-1} H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)$$

существует, является единственным и устойчивым. Кроме того, как показано в, $\|\widehat{\theta}_{N\alpha}^A - \widehat{\theta}_N^A\| \rightarrow 0$ при $\delta, h \rightarrow 0$ и $\alpha(\delta, h)$ таком, что

$$(\delta + h)/\alpha(\delta, h) \rightarrow 0, \quad (3.92)$$

где $\hat{\theta}_N^A$ – точное решение уравнения (3.90), т.е. алгоритм, даваемый уравнением (3.91) при выполнении асимптотики (3.92), является регуляризирующим.

Переходя к итерированному варианту рассматриваемого метода можно написать

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}_{N_r}^A &= \hat{\theta}_{N_{r-1}}^A + H_N^{(\delta)}(\hat{B}, \hat{G}_N) - \\ &\quad - W_N^{(h)}(\hat{B}, \hat{G}_N) \hat{\theta}_{N_{r-1}}^A, \\ r &= 1, 2, \dots, \quad \hat{\theta}_{N_0}^A = H_N^{(\delta)}(\hat{B}, \hat{G}_N), \end{aligned} \right\} \\ \left. \begin{aligned} \hat{\theta}_{N_r}^A &= \hat{\theta}_{N_{r-1}}^A + \nu(H_N(\hat{B}, \hat{G}_N) - \\ &\quad - W_N(\hat{B}, \hat{G}_N) \hat{\theta}_{N_r}^A), \\ r &= 1, 2, \dots, \quad \hat{\theta}_{N_0}^A \in H_1, \end{aligned} \right\} \quad (3.93)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}_N^A + \nu W_N(\hat{B}, \hat{G}_N) \hat{\theta}_{N_m}^A &= \\ = \hat{\theta}_{N_{m-1}}^A + \nu H_N(\hat{B}, \hat{G}_N), \\ m &= 1, 2, \dots, \quad \hat{\theta}_{N_0}^A \in H_1, \end{aligned} \right\} \quad (3.94)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}_{N_r}^A &= (E + \nu W_N(\hat{B}, \hat{G}_N))^{-1} \times \\ &\quad \times (\hat{\theta}_{N_{r-1}}^A + \nu H_N(\hat{B}, \hat{G}_N)), \\ r &= 1, 2, \dots, \quad \hat{\theta}_{N_0}^A \in H_1, \end{aligned} \right\} \quad (3.95)$$

где

$$\nu > 0. \quad (3.96)$$

В рамках упрощенной регуляризации в форме М.М. Лаврентьева также оказываются эффективными итерационные последовательности вида

$$\begin{aligned} \varepsilon \hat{\theta}_{N_r}^A + W_N(\hat{B}, \hat{G}_N) \hat{\theta}_{N_r}^A &= \\ = \varepsilon \hat{\theta}_{N_{r-1}}^A + H_N(\hat{B}, \hat{G}_N), \end{aligned} \quad (3.97)$$

$$\varepsilon > 0, \quad r = 1, 2, \dots, \quad \hat{\theta}_{N_0}^A \in H_1,$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}_{N_r}^A &= (\varepsilon E + W_N(\hat{B}, \hat{G}_N))^{-1} \times \\ &\quad \times (\varepsilon \hat{\theta}_{N_{r-1}}^A + H_N(\hat{B}, \hat{G}_N)), \end{aligned} \right\} \quad (3.98)$$

$$\varepsilon > 0, \quad r = 1, 2, \dots, \quad \hat{\theta}_{N_0}^A \in H_1,$$

а также более общая последовательность

$$\begin{aligned}
& (B + W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N))\widehat{\theta}_{N_r}^A = \\
& = B\widehat{\theta}_{N_{r-1}}^A + H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N), \quad (3.99) \\
& r = 1, 2, \dots, \quad \widehat{\theta}_{N_0}^A \in H_1,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\widehat{\theta}_{N_r}^A &= (B + W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N))^{-1} \times \\
& \times (B\widehat{\theta}_{N_{r-1}}^A + H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)), \quad (3.100) \\
& r = 1, 2, \dots, \quad \widehat{\theta}_{N_0}^A \in H_1,
\end{aligned}$$

где B – некоторый линейный, самосопряженный, положительный оператор.

Обе последовательности ((3.92) – (3.97) и (3.98), (3.99)) при точных $H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)$ и $W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)$ дают сходимость к решению $\widehat{\theta}_N^A$ уравнения (3.90), если оно существует и единственно, т.е. $\lim_{r \rightarrow \infty} \|\widehat{\theta}_{N_r}^A - \widehat{\theta}_N^A\| = 0$.

Известны также обобщения выше приведенных итерационных схем вида

$$\begin{aligned}
\widehat{\theta}_{N_r}^A &= (\varepsilon_{r-1}E + W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N))^{-1} \times \\
& \times (\varepsilon_{r-1}\widehat{\theta}_{N_{r-1}}^A + H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)), \\
& r = 1, 2, \dots, \quad \widehat{\theta}_{N_0}^A = 0, \\
\varepsilon_{r-1} = \widehat{\varepsilon}_{r-1} &= \frac{\|W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)\widehat{\theta}_{N_{r-1}}^A - H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)\|^2}{\|W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)\widehat{\theta}_{N_{r-1}}^A - H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)\|^2}
\end{aligned}$$

при

$$\begin{aligned}
\widehat{\varepsilon}_{r-1} &\geq \psi(\delta) > 0, \\
\varepsilon_{r-1} &= \psi(\delta),
\end{aligned}$$

при

$$\widehat{\varepsilon}_{r-1} < \psi(\delta),$$

$$\begin{aligned}
\widehat{\theta}_{N_r}^A &= (\varepsilon_{r-1}L + W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N))^{-1} \times \\
& \times (\varepsilon_{r-1}L\widehat{\theta}_{N_{r-1}}^A + H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)), \quad \varepsilon_{r-1} = \widehat{\varepsilon}_{r-1} = \frac{\|L^{1/2}(W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)\widehat{\theta}_{N_{r-1}}^A - H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N))\|^2}{\|W_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)\widehat{\theta}_{N_{r-1}}^A - H_N(\widehat{B}, \widehat{G}_N)\|^2} \\
& r = 1, 2, \dots, \quad \widehat{\theta}_{N_0}^A = 0,
\end{aligned}$$

при

$$\begin{aligned}
\widehat{\varepsilon}_{r-1} &\geq \psi(\delta) > 0, \\
\varepsilon_{r-1} &= \psi(\delta),
\end{aligned}$$

при

$$\widehat{\varepsilon}_{r-1} < \psi(\delta),$$

где $\psi(\delta)$, $\psi(0) = 0$ – некоторая заданная функция, а L – линейный самосопряженный положительный оператор.

При использовании выше приведенных итерационных алгоритмов выбор параметра регуляризации r можно апостериорным образом осуществлять по величине невязке на основе соотношения вида

$$\begin{aligned} & \|W_N^{(h)}(\hat{B}, \hat{G}_N)\theta_{N,i,r}^A - H_N^{(\delta)}(\hat{B}, \hat{G}_N)\| = \\ & = b(\delta + \|\theta_{N,i,r}^A\|h), \quad b > 1. \end{aligned}$$

Приведенные выше соотношения позволяют регуляризовать задачу оценивания вектора неизвестных параметров θ в уравнении (3.88) и тем самым повысить точность определения искомого вектора.

Рассмотренные алгоритмы нашли практическое применение в задачах синтеза многоканальных обзорных информационно-измерительных систем основных параметров процессов очистки сточных вод и показали свою эффективность.

3.9. Алгоритмы множественной идентификации и фильтрации измерений

При обработке последовательности наблюдений, поступающей от обзорных измерительных систем, оцениванию векторов состояния наблюдаемых объектов обычно предшествует идентификация измерений [12, 104]. Идентификация измерений производится с целью выделения для каждого из наблюдаемых объектов результатов измерения его состояния из множества измерений, составляющих очередное наблюдение.

Каждое из этих измерений может принадлежать одному из объектов или быть вызвано выбросом внутреннего шума аппаратуры (ложное измерение). В ходе идентификации измерений осуществляется построение симметричных стробов вокруг экстраполированных на момент очередного наблюдения оценок положения объектов в пространстве измерений, и в стробе каждого объекта отыскивается одно измерение, в некотором смысле ближайшее к его центру. В дальнейшем оно считается измерением состояния объекта и используется для коррекции оценки. Известны и другие процедуры идентификации измерений, например с использованием признаков, формируемых на этапе предварительной обработки измерительной информации [14]. Однако при любой процедуре идентификации измерений не исключается возможность ошибочного использования для коррекции оценки постороннего измерения, не несущего информации об оцениваемом векторе состояния.

Изменение состояния объекта описывается уравнением

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + G_k u_k, \quad (3.101)$$

где x_k – n -мерный вектор состояния объекта в момент времени t_k ; u_k – r -мерный вектор возмущений с нулевым средним и известной ковариационной матрицей $Q_k (M\{u_k\} = 0, M\{u_k u_j^T\} = Q_k \delta_{kj})$; Φ_k, G_k – матрицы соответствующего размера.

Последовательность измерений имеет вид

$$z_k = \gamma_k (H_k x_k + v_k) + (1 - \gamma_k) (H_k \hat{x}_{k/k-1} + w_k), \quad k \geq 1, \quad (3.102)$$

где z_k – m -мерный вектор измерения в момент t_k , полученный с выхода процедуры идентификации измерений; $\hat{x}_{k/k-1}$ – n -мерный вектор экстраполированной на момент t_k несмещенной оценки вектора состояния x_k , представляющей собой линейную функцию измерений z_1, \dots, z_{k-1} ; v_k – вектор аддитивного шума измерений ($M\{v_k\} = 0, M\{v_k v_j^T\} = R_k \delta_{kj}$); w_k – вектор случайного отклонения ложного измерения от центра строга $H_k \hat{x}_{k/k-1}$ ($M\{w_k\} = 0, M\{w_k w_j^T\} = S_k \delta_{kj}$); γ_k – скалярная случайная величина, принимающая значения 1 и 0 с вероятностями q_k и $p_k = 1 - q_k$ соответственно. Случайные векторы u_k, v_k, w_k, x_0 считаются распределенными симметрично относительно своих математических ожиданий.

Таким образом, модель измерений (3.102) предполагает, что в моменты времени t_k с вероятностями q_k производятся истинные измерения состояния объекта ($\gamma_k = 1$), искаженные аддитивным шумом, и с вероятностями – ложные измерения ($\gamma_k = 0$), представляющие собой шум, распределенный симметрично относительно центра строга и не несущий информации о состоянии объекта.

Шумы v_k, w_j, u_i предполагаются некоррелированными между собой, а также с γ_i и x_0 при любых i, j, k, l . При этом случайная величина γ_i оказывается не коррелированной с $z_j, x_j, v_j, \varepsilon_{j/j-1}$ для $j \leq l$ (здесь введены обозначения $v_j = z_j - H_j \hat{x}_{j/j-1}$ для невязки истинного измерения и $\varepsilon_{j/j-1} = x_j - \hat{x}_{j/j-1}$ для ошибки оценки $\hat{x}_{j/j-1}$). Из сделанных предположений, однако, не следует некоррелированность γ_j с элементами матриц $v_j v_j^T, w_j w_j^T, x_j \varepsilon_{j/j-1}^T$. Автокорреляционные свойства последовательности $\{\gamma_j\}$ определяются сделанными предположениями. В общем случае последовательность $\{\gamma_j\}$ небелая.

Задача состоит в том, чтобы для объекта, поведение которого описывается уравнением (3.101), по измерениям z_1, \dots, z_k вида (3.102) найти несмещенную линейную оценку $\hat{x}_{k+1/k}$ вектора состояния x_{k+1} , оптимальную в смысле минимума среднеквадратической ошибки.

Следуя [11], можно показать, что, эти уравнения имеют вид

$$\hat{x}_{k+1/k} = \Phi_k \hat{x}_{k/k-1} + \Phi_k W_k (z_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}), \quad (3.103)$$

$$W_k = \tilde{P}_{k/k-1} H_k^T \Gamma_k, \quad (3.104)$$

$$P_{k+1/k} = \Phi_k (P_{k/k-1} - W_k H_k \tilde{P}_{k/k-1}) \Phi_k^T + G_k Q_k G_k^T, \quad (3.105)$$

где $\tilde{\Sigma}_k = M\{\gamma_k v_k v_k^T\}$, $\tilde{S}_k = M\{(1-\gamma_k) w_k w_k^T\}$, $\tilde{P}_{k/k-1} = M\{\gamma_k x_k \varepsilon_{k/k-1}^T\}$, а $P_{k+1/k}$ – ковариационная матрица оценки $\hat{x}_{k+1/k}$, $\Gamma_k = (\tilde{\Sigma}_k + \tilde{S}_k)^{-1}$. Начальная оценка $\hat{x}_{1/0}$ выбирается из соображений несмещенности.

С целью обеспечения более высокой вычислительной устойчивости при определении матрицы W_k на основе выражения (3.104) целесообразно использовать стабилизирующую процедуру и рассчитывать матрицу Γ_k согласно выражения

$$\Gamma_k = (\tilde{\Sigma}_k + \tilde{S}_k + \alpha I)^{-1},$$

где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, I – единичная матрица.

Параметр α целесообразно выбирать на основе метода модельных примеров [14]. Полученный фильтр (3.103) оптимален в смысле минимума среднеквадратической ошибки в классе линейных фильтрована каждом шаге оценивания, использующих для коррекции оценки вектора состояния объекта одно измерение, признанное принадлежащим данному объекту на этапе идентификации измерений. В случае отсутствия ложных измерений ($q_k = 1$) фильтр (3.103) превращается в обычный фильтр Калмана и предназначен для замены последнего при ненулевой вероятности появления ложных измерений ($q_k < 1$).

Существенной особенностью предлагаемого фильтра является использование в уравнениях (3.103)-(3.105) матриц $\tilde{\Sigma}_k, \tilde{S}_k, \tilde{P}_{k/k-1}$. Эти матрицы вычисляются для конкретной процедуры идентификации измерений, исходя из характеристик потока ложных измерений и ковариационной матрицы $P_{k/k-1}$.

Априорный характер фильтра обуславливает независимость последовательности значений ковариационной матрицы $P_{k+1/k}$ и весовой матрицы W_k от результатов измерений, что делает возможным заблаговременное вычисление этих последовательностей. Такая

возможность оказывается ценной в системах сопровождения множества однотипных объектов, поскольку значения матриц $P_{k+1/k}$, W_k совпадают для всех сопровождаемых объектов. Объем памяти, необходимый для запоминания весовых матриц, непосредственно используемых для коррекции оценок, не превышает соответствующего объема памяти, требуемого фильтром Калмана.

В том случае, когда процедура идентификации измерений обеспечивает некоррелированность случайной величины γ_k с элементами матриц $\nu_k \nu_k^T$, $w_k w_k^T$, $x_k \varepsilon_{k/k-1}^T$, имеем

$$\begin{aligned}\tilde{\Sigma}_k &= q_k H_k P_{k/k-1} H_k^T + q_k R_k, \\ \tilde{S}_k &= (1 - q_k) S_k, \\ \tilde{P}_{k/k-1} &= q_k P_{k/k-1}, \\ W_k &= q_k P_{k/k-1} H_k^T [q_k (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k) + (1 - q_k) S_k + \alpha I]^{-1}.\end{aligned}\quad (3.106)$$

Идентификация измерений может производиться и на основе анализа некоторой дополнительной информации, что обеспечивает некоррелированность случайной величины γ_k с элементами матриц $\nu_k \nu_k^T$, $w_k w_k^T$, $x_k \varepsilon_{k/k-1}^T$ и оптимальность фильтра (3.103) с весовой матрицей (3.104).

Рассмотрим процедуру идентификации измерений, состоящую в выборе измерения, соответствующего наиболее интенсивному сигналу, в качестве истинного измерения. Как известно [20], амплитуда прошедшего квадратичный детектор и обнаруженного случайного сигнала от объекта в предположении о нормальности шумов может быть аппроксимирована случайной величиной с плотностью вероятности

$$f_H(y) = \frac{1}{1 + \theta} \exp\left(-\frac{y - c}{1 + \theta}\right), \quad y > c,$$

где θ – отношение сигнал/шум; c – порог обнаружения, а ложно обнаруженный сигнал описывается плотностью

$$f_L(y) = \exp(-y + c), \quad y > c.$$

Рассматриваемая процедура идентификации обеспечивает, в предположении о стационарном пуассоновском потоке ложных измерений, вероятность правильной идентификации истинного измерения

$$q_k = \exp\left(-\mu K_{(m)} \lambda_c^m \frac{1}{2 + \theta}\right).$$

Поскольку в рассматриваемом случае γ_k не коррелирована с

элементами матриц $v_k v_k^T, w_k w_k^T, x_k \varepsilon_{k/k-1}^T$ оптимальным для рассматриваемой процедуры идентификации будет фильтр (3.103) с весовой матрицей (3.104).

Приведенные алгоритмы при любой процедуре идентификации измерений позволяют исключить возможность ошибочного использования для коррекции оценки постороннего измерения, не несущего информации об оцениваемом векторе состояния.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

4.1. Физические и математические модели оптоэлектронных преобразователей на основе полых световодов для систем контроля параметров воды

В настоящее время существенно увеличилось количество промышленных установок, оборудованных микропроцессорами, которые обеспечивают эффективную связь объектов контроля со средствами контроля и управления. Этот фактор диктует необходимость разработки преобразователей, совместимых с микропроцессорами электрически и конструктивно, а также по точности, надежности, быстродействию и стоимости [141, 143].

Одним из универсальных преобразователей, совместимых с микропроцессорами и способных эффективно осуществлять преобразования различных физических величин, являются оптоэлектронные преобразователи (ОП), в которых измеряемая величина воздействует на оптический канал, изменяя параметр излучаемого потока при его распространении от источника к приемнику.

Наиболее пригодными по комплексу показателей для контроля расхода воды в открытых каналах, уровня воды в аэротенках, запыленности окружающей среды, и заиленности канализационных, водоочистных водоотводящих сооружениях и других, являются оптоэлектронные преобразователи с волоконными и полыми световодами. Эффективное решение указанных задач возможно путем создания приборов на основе введения микропроцессорных комплектов в их состав [27].

Среди оптоэлектронных преобразователей наибольшее развитие получили волоконно-оптические преобразователи и недостаточно исследовано оптоэлектронные преобразователи на основе полых

световодов (ОПС). На рис. 4.1 приведена схема ОПС с сосредоточенным источником излучения 1, у которого полый световод может быть длиной от $10 \cdot 10^{-3}$ м до 3 м и более.

В конструкцию модели ОПС входит полый (обычно трубчатый) световод 2 (из органического, кварцевого стекла или полированного тонкостенного дюралюминия), сосредоточенный источник излучения 1, приемники излучения 3. Последние располагаются в полости световода и свободно могут перемещаться вдоль оси световода. Световой поток от источника излучения 1 через круговую диафрагму 4 распространяется вдоль полого световода 2.

Процесс распределения светового потока от сосредоточенного источника излучения в полом световоде существенно отличается от процессов распределения оптического излучения от распределенного источника излучения. Это объясняется тем, что кроме прямого светового потока на приемник излучения 3 падает поток, образованный лучами, отраженными от внутренней поверхности полого световода. Кроме того, световой поток от ИИ, проходя вдоль длинного полого световода, непрерывно поглощается средой, заполняющей полость между источником и приемником излучения и материалом полого световода. Расчет распределения светового потока $\Phi(x)$ в ОПС, представляет весьма сложную задачу, так как $\Phi(x)$ зависит от длины L , диаметра D световода, коэффициентов отражения ρ , поглощения K_x, K_y , от размеров и характера ИИ и места его установки в световоде и от других факторов.

Рассмотрим построение математической модели ОПС на примере основного типа полого световода (рис. 4.2), содержащей трубчатый полый световод с $D(x) = const; \beta_1(x) = const; k_x(x) = const; k_y(x) = const$.

Для данного типа ОПС удобно отдельно рассматривать световой поток $\Phi_{np}(x)$ без отражения (прямой) и световой поток $\Phi_{отр}(x)$, отраженный от боковой поверхности полого световода, которые являются составляющими суммарного потока $\Phi_{\Sigma}(x)$, падающего на ПИ:

$$\Phi_{\Sigma}(x) = \Phi_{np}(x) + \Phi_{отр}(x) \quad (4.1)$$

Для анализа распределения прямого светового потока в простых и сложных (составных) световодах необходимо использовать известное выражение, связывающее силу света I с потоком $\Phi(x)$, который распространяется от ИИ в пределах телесного угла Ω :

$$I = \Phi(x) / \Omega \quad (4.2)$$

Уравнение для распределения прямого потока вдоль полого

световода с учетом поглощения светового потока может быть записано в виде:

$$\Phi_{\text{пр}}(x) = I\Omega \exp(-K_x x) = I \frac{S}{x^2} \exp(-K_x x) \quad (4.3)$$

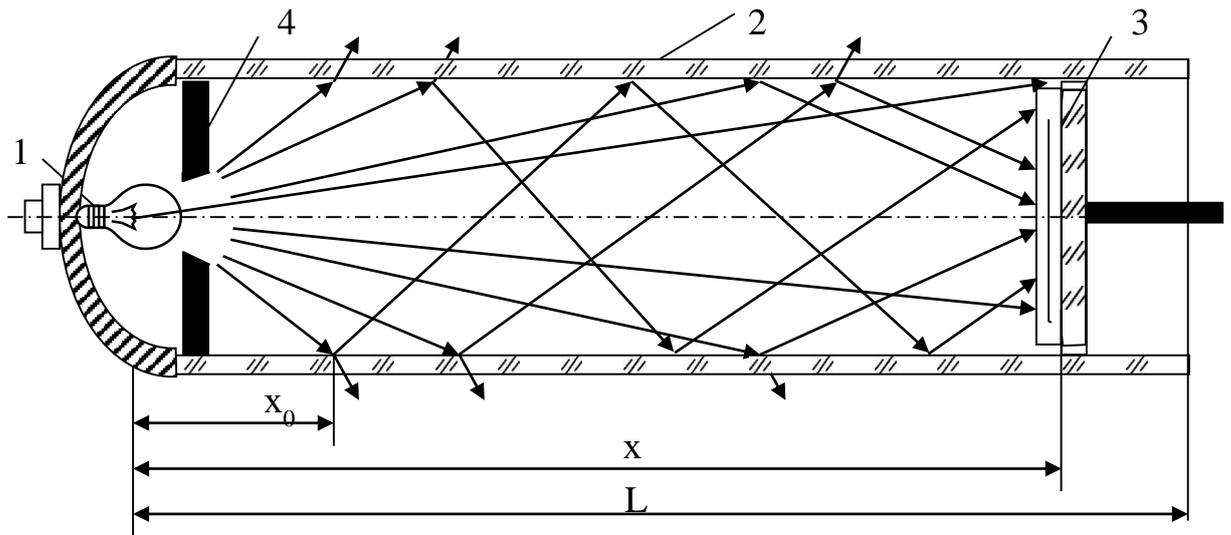


Рис. 4.1. Схема ОПС с сосредоточенным источником излучения.

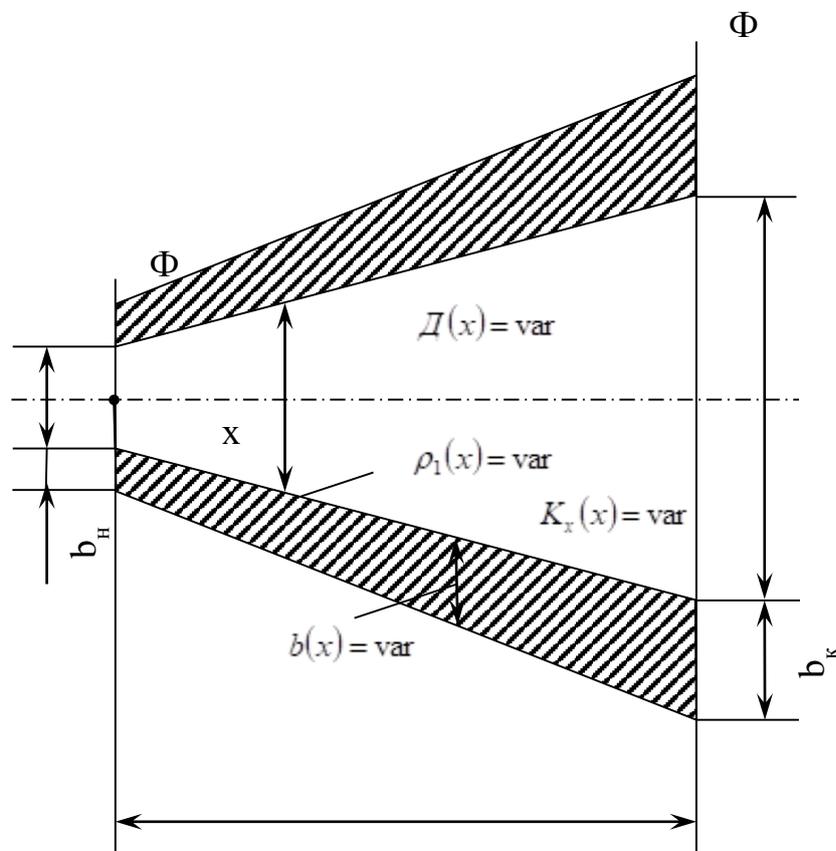


Рис.4.2. Наиболее сложный тип полого световода ОПС.

Несколько сложнее обстоит вопрос определения отраженного светового потока $\Phi_{отр}(x)$ и потока $\Phi_{проу}(x)$, прошедшего через стенку (или поглощенного внутренней стенкой).

Пусть ИИ помещен на оси и дает пучок лучей с малой апертурой.

Рассмотрим прохождение по полому световоду длиной L одного луча из этого пучка. Длина пути луча, вошедшего в световод под углом u к оси, равна

$$L_u = L / \cos u \quad (4.4)$$

Число отражений такого луча от стенки полого световода [127, 129]

$$n = \frac{L}{D} \operatorname{tgu} \quad (4.5)$$

При каждом отражении луч частично поглощается стенкой полого световода или проходит через нее. Если принять за ρ коэффициент отражения внутренней стенки полого световода, то $(1-\rho)$ будет определять часть световой энергии, прошедшей через стенку полого световода, т.е. коэффициент K_y равен:

$$K_y = 1 - \rho \quad (4.6)$$

В общем случае коэффициенты ρ и K_y , как было указано выше, являются функциями угла падения лучей, однако учет этой зависимости существенно усложняет расчет и поэтому в дальнейшем вводятся расчетные значения $\rho_{рас}$ и $K_{y рас}$.

Полный световой поток распространяется в полом световоде, имея входной телесный угол $\Omega_{вх}$, поэтому

$$\Phi_{\Sigma}(x) = I \int_0^{\Omega_x(x)} d\Omega \quad (4.7)$$

Так как он состоит из прямого и отраженного потоков, то

$$\Phi_{\Sigma}(x) = I \left[\int_0^{\Omega_x(x)} d\Omega + \int_{\Omega_{xx}}^{\Omega_{вх}(x)} d\Omega \right] \quad (4.8)$$

Таким образом, падающий (до отражения) на внутреннюю

поверхность стенки полого световода световой поток определяется из выражения

$$\Phi_{\text{пад}}(x) = I \int_{\Omega_{xx}}^{\Omega_{\text{вх}}(x)} d\Omega = IS \left(\frac{1}{x_0^2} - \frac{1}{x^2} \right) \quad (4.9)$$

где x_0 - начало диапазона перемещений, для практических конструкций ОПС диапазон перемещений начинается не с $x=0$ (что совпадает с местом установки ИИ), а с $x=x_0$ (которое определяется исходя из места установки круговой диафрагмы).

Достаточно точную для практических расчетов формулу для определения отраженного светового потока можно получить из выражения

$$\Phi_{\text{отр}}(x) = \Phi_{\text{пад}}(x) \rho_{\text{рас}} \quad (4.10)$$

С учетом числа отражений расчетный коэффициент отражения

$$\rho_{\text{рас}} = \int_{u_x}^{u_0} \rho_{\frac{x}{D}}^{\text{tg} u} du \quad (4.11)$$

где $u_0 = \arctg \frac{D}{2x_0}$; $u_x = \arctg \frac{D}{2x}$

Для коэффициента K_y можно записать

$$K_{y \text{ рас}} = 1 - \rho_{\text{рас}} \quad (4.12)$$

С учетом вышеизложенного распределение светового потока, прошедшего через боковую стену полого световода, определяется из выражения

$$\Phi_{\text{прош}}(x) = IS \left(\frac{1}{x_0^2} - \frac{1}{x^2} \right) K_{y \text{ рас}} \quad (4.13)$$

а распределение отраженного потока от боковой стенки полого световода $\Phi_{\text{отр}}(x)$ определяется на основе (4.9) с учетом (4.10), (4.11) и имеет вид

$$\Phi_{\text{отр}}(x) = IS \left(\frac{1}{x_0^2} - \frac{1}{x^2} \right) \int_{u_x}^{u_0} \rho_{\frac{x}{D}}^{\text{tg} u} du e^{-K_{yx} \int_{u_x}^{u_0} \frac{1}{\cos u} du} \quad (4.14)$$

Таким образом, для ОПС суммарный световой поток, падающий на ПИ, равен

$$\Phi_{\Sigma}(x) = I \frac{S}{x^2} e^{-K_x x} + IS \left(\frac{1}{x_0^2} - \frac{1}{x^2} \right) \int_{u_x}^{u_0} \rho \frac{x}{D} \operatorname{tg} u \, du e^{-K_x x \int_{u_x}^{u_0} \frac{1}{\cos u} du} \quad (4.15)$$

где $\int_{u_x}^{u_0} \frac{1}{\cos u} du$ - учитывает длину пути отраженных лучей (2.13).

Выражение (2.19) можно преобразовать к виду

$$\Phi_{\Sigma}(x) = I \frac{S}{x^2} \left[e^{-K_x x} + \left(\frac{x^2}{x_0^2} - 1 \right) e^{-K_x x \int_{u_x}^{u_0} \frac{1}{\cos u} du} \int_{u_x}^{u_0} \rho \frac{x}{D} \operatorname{tg} u \, du \right] \quad (4.16)$$

Ввиду сложности интегральных выражений его целесообразно решать численным методом на ЭВМ.

На рис. 4.3 приведены зависимости относительного значения суммарного светового потока $\Phi(x)/\Phi_0$ (где Φ_0 - значение потока при $x = x_0$) от координаты перемещения x подвижного приемника излучения (рис. 4.2), рассчитанные на ЭВМ при следующих данных: $D=0,055$ м; $L=1,4$ м; $x_0=0,1$ м; $I=66$ Кд; $K_x=10^{-4}$ м⁻¹.

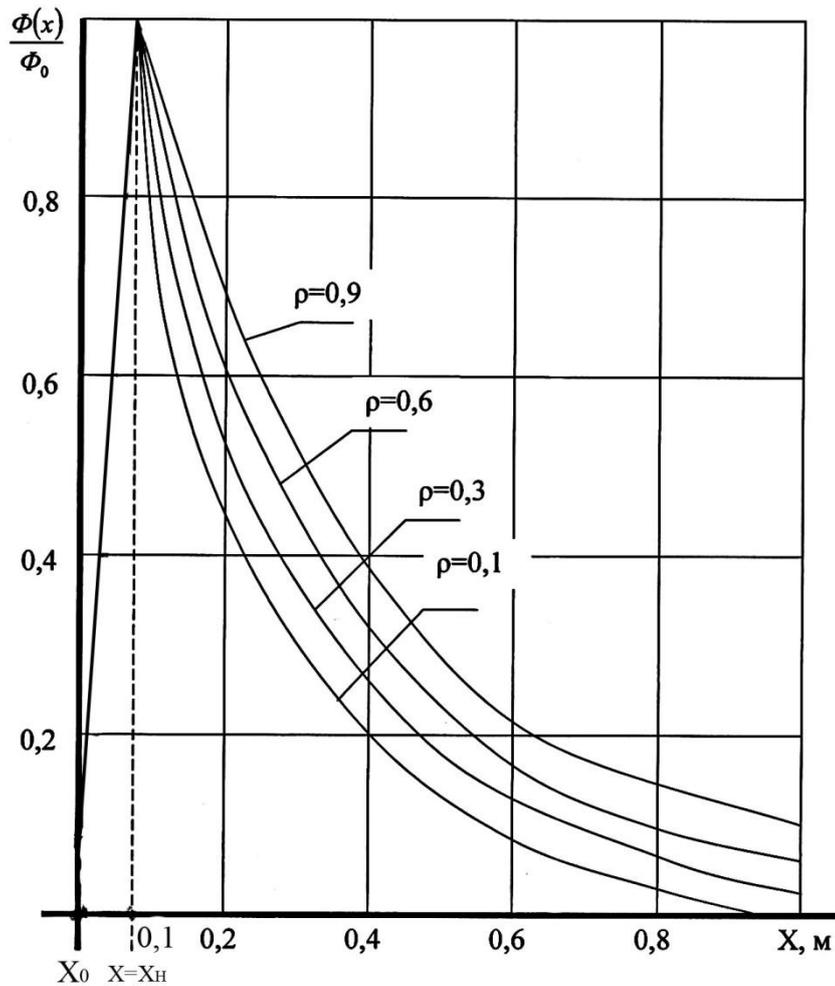


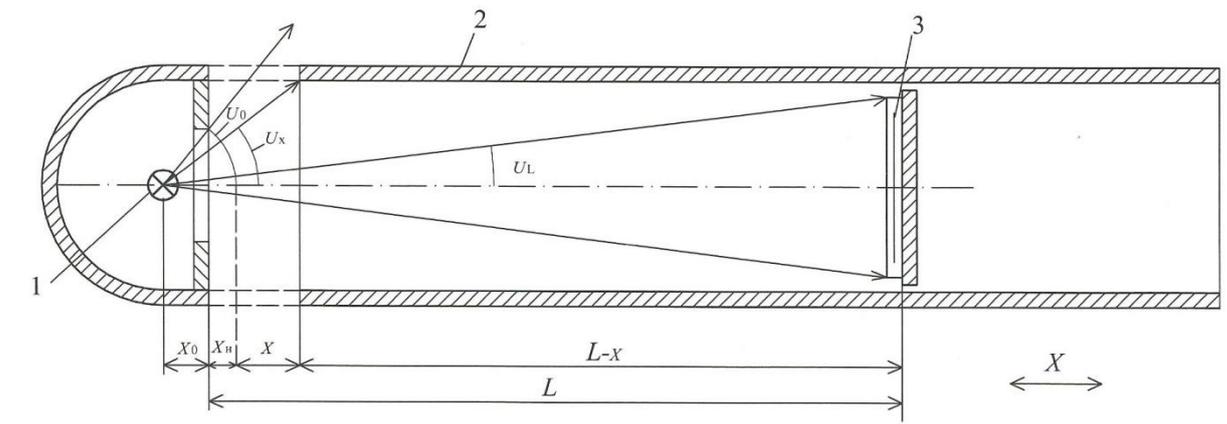
Рис.4.3. График распределения $\Phi(x)/\Phi_0$ при различных коэффициентах отражения ρ внутренней поверхности световода.

На рис. 4.4 а приведена конструкция ОПС с неподвижными источником излучения (ИИ) 1 и приемником излучения (ПИ) 3, а подвижный полый световод 2, перемещается в диапазоне $0 \leq x \leq L$. В этой конструкции ОПС ИИ 1 расположен не на входном торце, а на расстоянии x от световода.

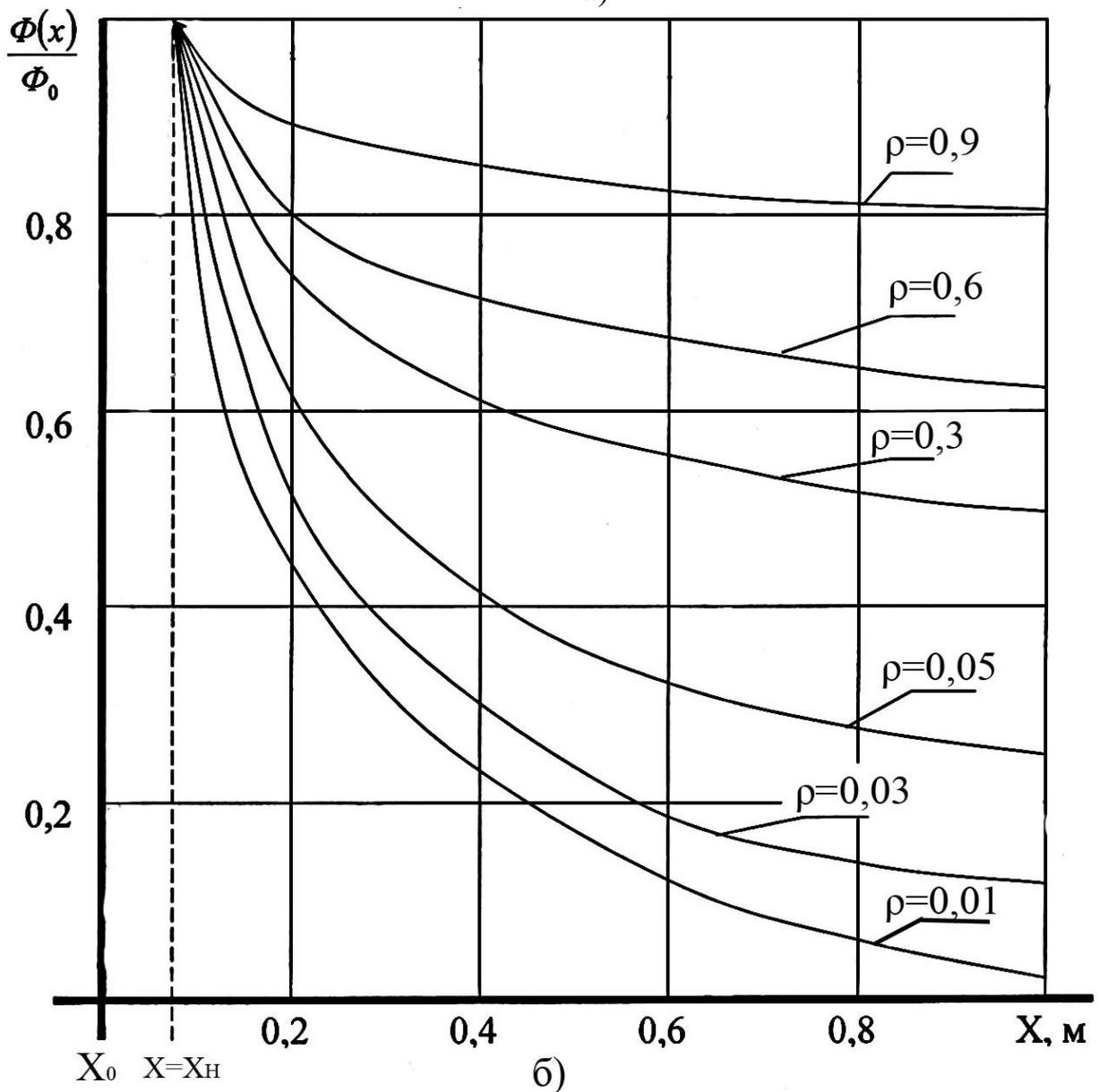
Прямой световой поток $\Phi_{пр}$ согласно (4.3) равен

$$\Phi_{пр} = I \frac{S}{L^2} e^{-KxL} \quad (4.17)$$

Отраженный световой поток будет определяется выражением



а)



б)

Рис. 4.4. ОПС с продольным перемещением полого световода при неподвижных источниках и приемниках излучения: а – схема; б – графики распределения $\Phi(x)/\Phi_0$ при различных значениях ρ .

$$\Phi_{\text{отр}}(x) = IS \left(\frac{1}{x^2} - \frac{1}{L^2} \right) \times \int_{u_L}^{u_x} \rho \frac{L}{D} \operatorname{tg} u \, du e^{-K_x L \int_{u_L}^{u_0} \frac{1}{\cos u} du} \quad (4.18)$$

Суммарный поток, падающий на ПИ

$$\Phi(x) = I \frac{S}{L^2} \left[e^{-K_x L} + \left(\frac{L^2}{x^2} - 1 \right) e^{-K_x L \int_{u_L}^{u_0} \frac{1}{\cos u} du} \int_{u_L}^{u_x} \rho \frac{L}{D} \operatorname{tg} u \, du \right] \quad (4.19)$$

4.2. Оптоэлектронный преобразователь с полым световодом и кольцевым приемником излучения

С учетом принципиальной схемы ОПС (рис.4.5) для преобразования злогольного перемещения внешнего модулирующего тела (ВМТ) граф принципов построения имеет вид, представленный на рис.4.6. Цепь питания ииirroНННКа излучения (ИИ) представлена подграфом $U_{\text{э1}}, I_{\text{э1}}$ (электрические |влряжения и ток), для которой сочетания схемной функции $T_{\text{э1}}$ и параметра цепи $P_{\text{э1}}$ отображает связь между электрическим током $I_{\text{э1}}$ и напряжением $U_{\text{э1}}$ цепи питания. В цепи $I_{\text{э1}}$ $\Phi_0(0)$ ток $I_{\text{э1}}$ преобразуется в световой поток $\Phi_0(0)$, что отображается коэффициентом межцепной связи $K[I_{\text{э1}}, \Phi_0(0)]$.

Вывод математической модели ОПС с кольцевым приемником излучения рассмотрим при продольных перемещениях уровня жидкости в полым световоде. Пусть в полым световоде (ПС) световой поток при $X=0$ $\Phi_0(0)$ распространяясь вдоль координаты X на выходе ПС имеет значение $\Phi_0(x)$. где X - длина перемещения уровня жидкости. Далее световой поток, лившись от поверхности внешнего плоского тела в виде светового потока $\Phi_{02}(x) = \Phi_{01}(x)\rho_2$ (где ρ_2 - коэффициент отражения поверхности жидкости), обратно входит в ПС и после многократных отражений падает на приемник излучения (ПИ), что отображается оптической цепью $\Phi_{02}(x), \Phi_{02}(0)$. Так как выходной сигнал целесообразно получать в виде электрического напряжения, то в цепи $\Phi_{02}(0), U_{\text{э2}}$ происходит преобразование светового потока $\Phi_{02}(0)$ в электрическое напряжение $U_{\text{э2}}$ что отображается коэффициентом межцепной связи $K[\Phi_{02}(0), U_{\text{э2}}]$.

Прямой световой поток без отражений о внутреннюю стенку световода, падающий на приемник излучения и входящий в полый

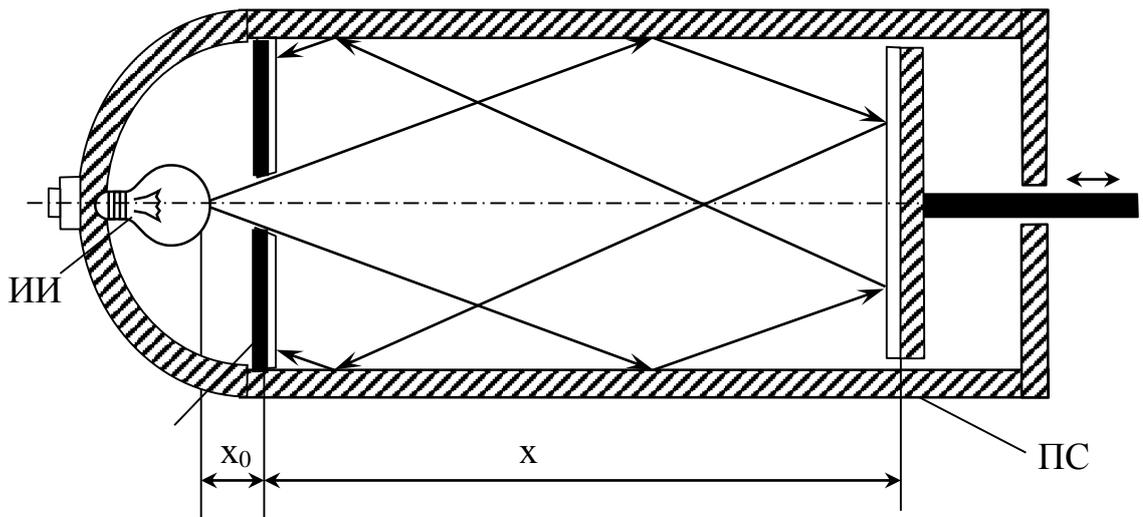


Рис.4.5. Принципиальная схема ОПС с кольцевым приемником

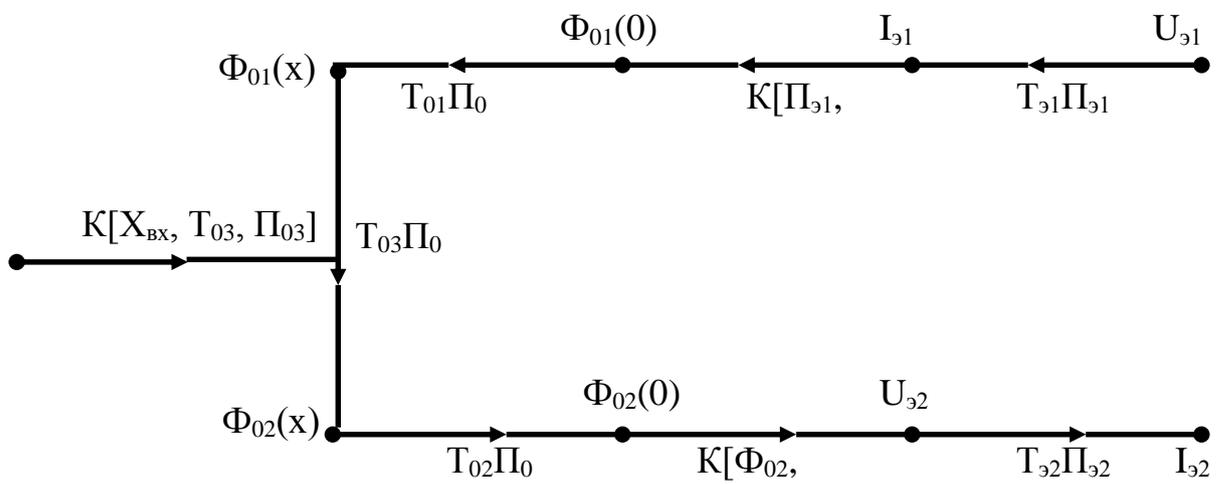


Рис.4.6. Графовая модель ОПС с кольцевым приемником

световод в пределах

угла $0 < U < U_1$ определяется из выражения [120]

$$\Phi_{\text{пр1}}(x) = I_0 \frac{\pi(D^2 - D_0^2)}{4(2x)^2} \rho_2 e^{-K_x 2x}, \quad (4.20)$$

где I_0 - сила света источника; D, D_0 - диаметры соответственно полого световода и отверстия диафрагмы; ρ_2 - коэффициент отражения поверхности внешнего модулирующего тела (диска); K_x - коэффициент поглощения средой, заполняющей полый световод; X - координата перемещения внешнего модулирующего тела.

Лучи, вышедшие из источника излучения под углом $U_1 \leq U \leq U_2$ будут отражаться как от поверхности диска (ВМТ) с коэффициентом отражения ρ_2 , так и от внутренней поверхности полого световода с коэффициентом отражения ρ_1 .

Световой поток, отраженный от внутренней поверхности полого световода, определяется по формуле

$$\Phi_{\text{отр2}} = I_0 \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{4} \rho_2 \left[\frac{1}{x_0^2} - \frac{1}{4x^2} \right] \cdot e^{-K_x 2x} \int_{U_1}^{U_2} \frac{1}{\cos U} dU \cdot \int_{U_1}^{U_2} \rho_1 \frac{2x}{D} \text{tg} U dU \quad (4.21)$$

Таким образом, на приемник излучения падает суммарный световой поток, равный

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\text{пр1}} + \Phi_{\text{отр2}} \quad (4.22)$$

$$\Phi_{\Sigma} = I_0 \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{16x^2} \left[\rho_2 e^{-K_x 2x} + \left(\frac{4x^2}{x_0^2} - 1 \right) \cdot e^{-K_x 2x} \int_{U_1}^{U_2} \frac{1}{\cos U} dU \cdot \int_{U_1}^{U_2} \rho_1 \frac{2x}{D} \text{tg} U dU \right] \quad (4.23)$$

Анализ формулы (4.23) показывает, что в данном ОПС важными являются параметры ρ_1, ρ_2, D_1, x_0 , которые определяют чувствительность и другие характеристики преобразователя.

4.3. Экспериментальные исследования оптоэлектронных преобразователей с полыми световодами

С целью проверки адекватности математических моделей были проведены экспериментальные исследования на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 4.7.

При экспериментальных исследованиях ОПС с продольным перемещением в качестве подвижного элемента был использован круглый диск 5, поверхность которого 4 могла изменяться путем укрепления на ней различных пленок с коэффициентами отражения от $\rho_l=0,1$ (черная бархатная пленка) до $\rho_l=0,9$ (алюминиевая или зеркальная поверхность). В экспериментах изменяли также материал полого световода 1, путем установок трубок из алюминия, стекла (кварцевого, органического, технического), черной бумаги и других. Световой поток от источника излучения (лампа накаливания типа А, напряжением 4В), через круговую диафрагму кольцеобразного приемника излучения 3 (фоторезистор типа ФСК-6) направляется вдоль полого световода 1, диаметром $D=0,032$ м., длиной $L=0,16$ м на подвижной светоотражающий диск 4 и после отражения световой поток возвращаясь обратно падал на светочувствительную поверхность кольцеобразного ПИ 3. В качестве нагрузки фоторезистора ФСК-6 использовался переменный резистор R_H (СП5-14, СП3-39, сопротивлением $R_H=47$ кОм, 100 кОм).

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ на нагрузочном сопротивлении R_H измерялось цифровым вольтметром типа UNI-T UT60B. Так как при малых значениях освещенности фототок, протекающий через сопротивление нагрузки R_H , линейно зависит от светового потока $\Phi_0(x)$, то относительные значения распределения светового потока $\Phi_0(x)/\Phi_0(x_0)$ в результате обработки экспериментов определялись, как

$$\frac{\Phi_0(x)}{\Phi_0(0)} = \frac{U_{\text{вых}}(x)}{U_{\text{вых}}(x=0)} \quad (4.24)$$

где $U_{\text{вых}}(x)$ - падение напряжения на резисторе R_H при перемещении светоотражающей поверхности на расстоянии $x=x_0$ от источника излучения 2.

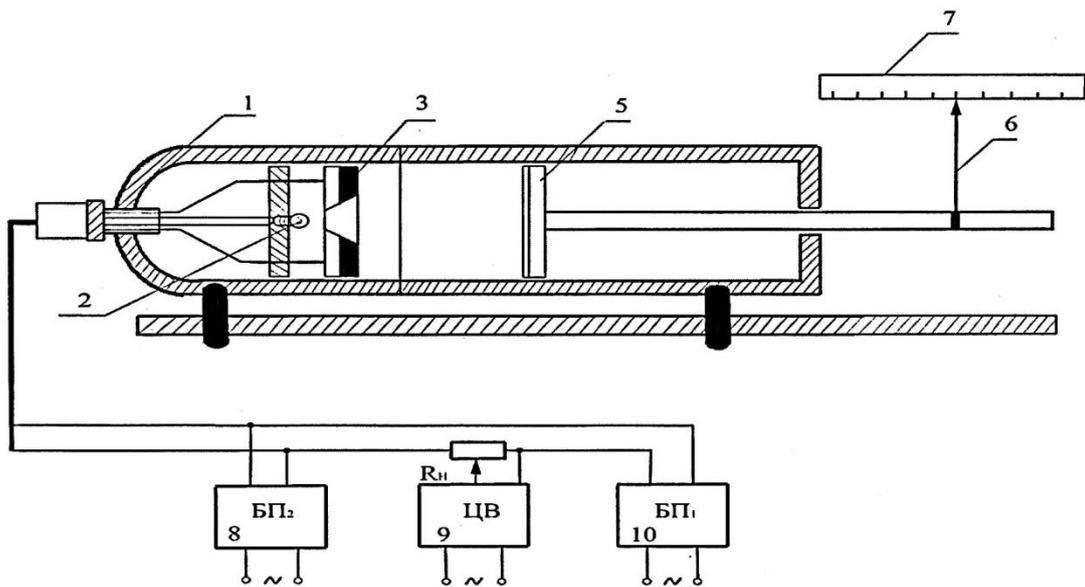


Рис. 4.7. Экспериментальная установка для исследования ОПС продольным перемещением подвижных элементов.

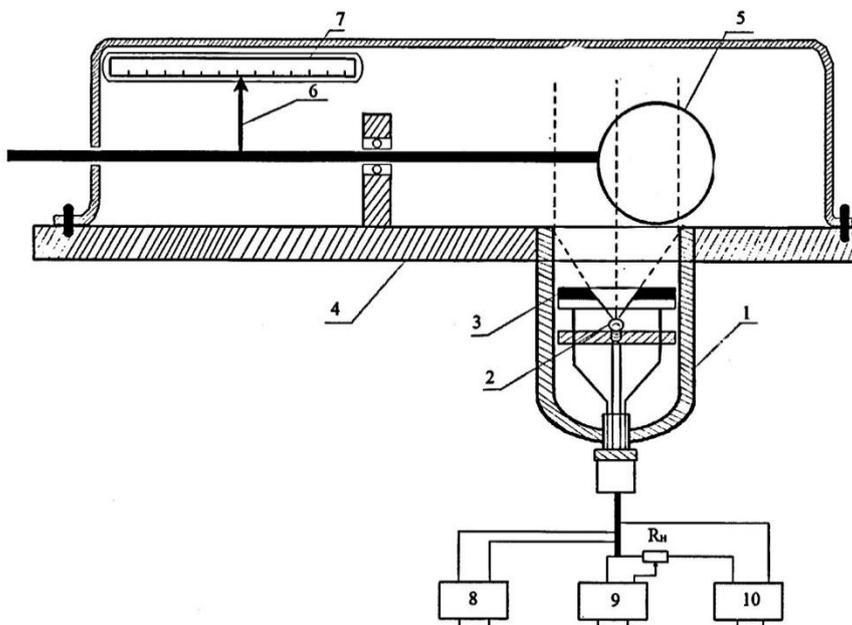


Рис. 4.8. Экспериментальная установка для исследования ОПС поперечным перемещением подвижных элементов.

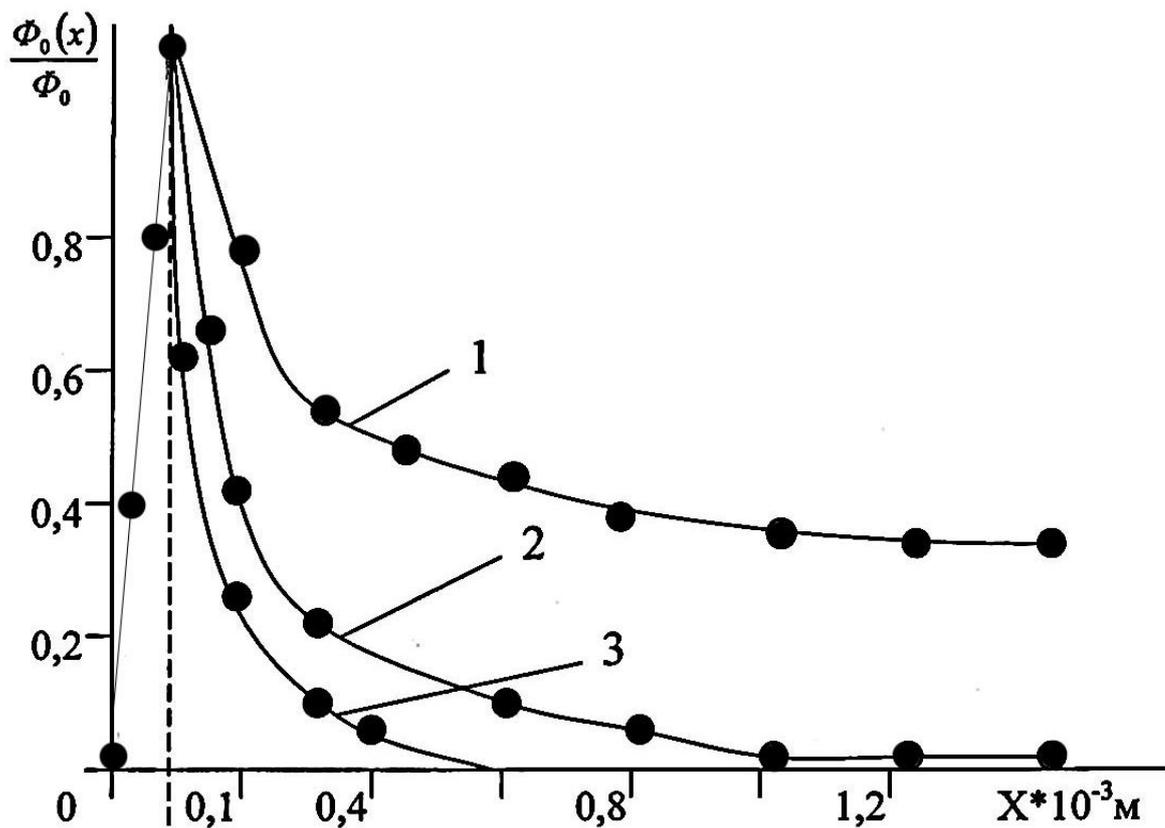
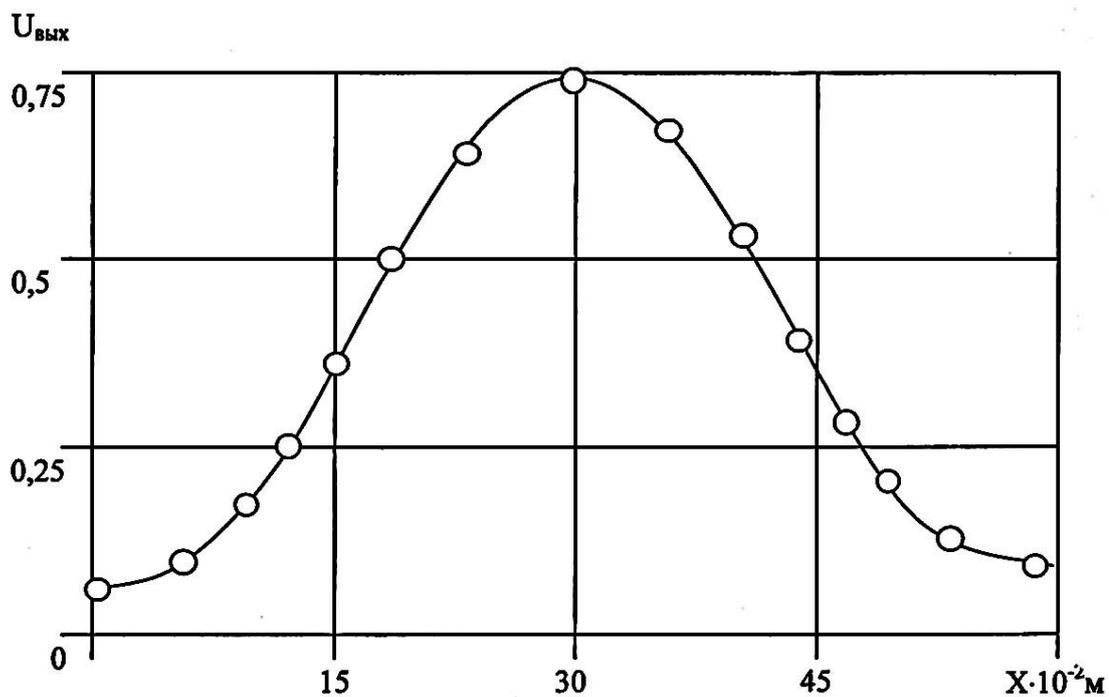


Рис. 4.9. График изменения относительного значения $\Phi_0(x)/\Phi_0(x_0)$, при различных материалах внутренней поверхности полого световода: 1 – алюминий; 2 – стекло; 3 – черная бумага.

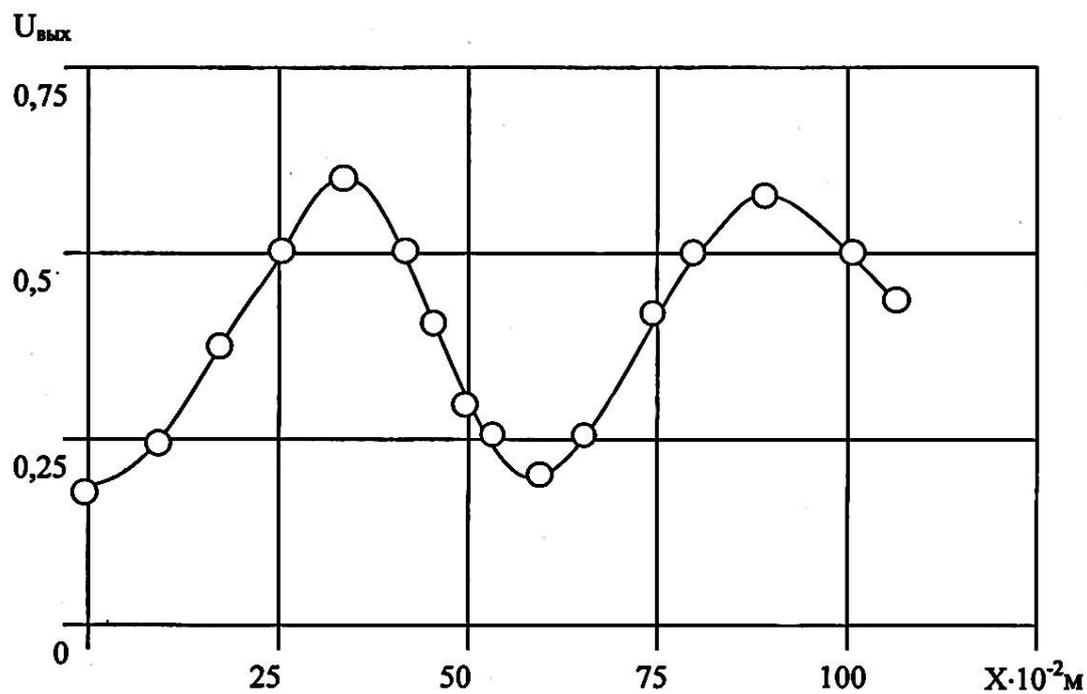
Экспериментальные исследования распределения $\Phi_0(x)/\Phi_0$ проводились на установке, схема которой приведена на рис. 4.8, в которой подвижным элементом может быть, как полый световод 3, так и приемник излучения 6. От источника излучения 4 (лампы накаливания напряжением 4 В типа А) световой поток через круговую диафрагму 5 направляется вдоль полого световода 2 диаметром 0,055 м, длиной $L=1,4$ м на подвижный приемник излучения 6 – фотодиод типа ФД-24К, который работает в фотодиодном режиме при напряжении смещения 15 В, подаваемом от стабилизированного источника питания 10 типа Б45-5. В качестве нагрузки фоторезистора используется резистор R_n . выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ на нагрузочном сопротивлении R_n измерялось цифровым вольтметром 11 типа UNI-T UT60B.

Так как при малых освещенностях фототок, протекающий через сопротивление нагрузки R_n , линейно зависит от светового потока $\Phi_0(x)$, то относительные значения распределения светового потока $\Phi_0(x)/\Phi_0$ в результате обработке экспериментов определялись как

$$\Phi_0(x)/\Phi_0 = U_{\text{вых}}(x)/U_{\text{вых}}(x_0) \quad (4.25)$$



а)



б)

Рис. 4.10. Экспериментально полученные графики распределения выходного сигнала ОПС при поперечных перемещениях светоотражающего шарика (а) и ленты (б) со светоотражающими и светопоглощающими метками.

где $U_{вых}(x)$ - падение напряжения на резисторе R_n при перемещении приемника излучения б; $U_{вых}(x_0)$ - падение напряжения при $x=x_0$ [130].

На рис. 4.9 приведены результаты экспериментальных исследований распределения светового потока $\Phi_o(x)/\Phi_o(0)$, прошедшего через полый световод (стеклянную трубку с размерами $D_{вн}=0,055$ м; $D_{нар}=0,067$; $L=1,4$ м) при $K_y=0,9$ и $K_y=0,1$. Снаружи световода подвижным ПИ был фотодиод типа ФД-24К.

В таблице 4.1 приведены данные, полученные при проведении эксперимента. На рис. 4.9 приведены результаты экспериментальных исследований распределения светового потока $\Phi(x)/\Phi_o(0)$ при полых световодах, изготовленных из различных материалов (алюминий, стекло, черная бумага, медный лист и т.д.). Сравнение результатов экспериментальных исследований с результатами на ЭВМ показывают хорошее согласование на рис. 4.9.

Таблица 4.1

$X, мм$	$U(x), мВ$	$X, мм$	$U(x), мВ$
0	80	45	111
1	88	55	102
2	93	65	92
3	109	75	83
4	118	85	75
5	122	95	73
10	136	105	70
15	138	115	68
25	132	125	67
35	118	135	63

Экспериментальные исследования ОПС с поперечным перемещением модулирующего тела проводились на экспериментальных установках, схемы которых приведены на рис. 4.8. Эксперименты с ОПС с поперечным перемещением ленты со светлыми и темными полосами были проведены при следующих данных: $D=0,032$ м; $D_1=0,012$ м; $X_0=0,01$ м; ширина полос $AB=0,032$ м; $BC=0,032$ м. На экспериментальных установках (рис.2.19) параметры источников и приемников излучения, а также измерительной схемы были аналогичны параметрам этих элементов на экспериментальной установке, приведенной на рис. 4.7. На рис. 4.10 приведены результаты экспериментальных исследований ОПС с поперечным перемещением ленты со светлыми и темными полосами (а) и светоотражающего шарика (б).

Данные эксперимента хорошо согласуется с данными

распределения светового потока $\Phi_0(x)/\Phi_0(0)$ рассчитанные на ЭВМ и расхождение не превышает 8-10 % .

4.4. Анализ источников погрешностей оптоэлектронных преобразователей с полыми световодами

Наиболее важной характеристикой ОПС является его погрешность. Именно погрешность определяет окончательный набор того или иного типа ОПС для решения конкретной задачи получения первичной информации о системах контроля и управления.

Общие вопросы погрешностей первичных преобразователей достаточно полно освещены в ряде работ [110], поэтому ниже будут рассмотрены вопросы анализа погрешности и методы повышения точности, которые наиболее характерны для рассматриваемых ОПС.

Под погрешностью ОПС будем понимать разность между действительным значением входной величины и ее расчетным значением, которое согласно статической характеристике ОПС соответствует действительному значению входной величины.

По способу численного выражения погрешности ОПС следует подразделять на абсолютные, относительные и приведенные.

Нормирование точности ОПС сводится к указанию полосы погрешностей в диапазоне преобразований.

При линейной статической характеристике ОПС и наличии только аддитивной составляющей погрешности, текущее значение абсолютной погрешности $\gamma_a = \pm \Delta_0$ и величина относительной погрешности

$$\gamma_a = \pm \Delta_0 \quad (4.26)$$

При наличии только мультипликативной составляющей погрешности, текущее значение абсолютной погрешности $\gamma_a = \gamma_k * x$ и величина относительной погрешности $\gamma_o = \gamma_k$, где γ_k - относительная погрешность изменения чувствительности ОПС, K - чувствительность ОПС.

При наличии одновременно аддитивной и мультипликативной составляющих, полоса погрешностей определяется выражением:

$$d = 2\Delta_0 + 2\gamma_k x. \quad (4.27)$$

Для ОПС в большинстве случаев нормирование погрешностей с

помощью формулы (4.27) оказывается достаточно полным.

Точность ОППС является положительной характеристикой, которая по смыслу противоположно погрешности. Существуют различные определения понятия точности преобразователей [132], что объясняется большим разнообразием самих преобразователей и различием требований к ним.

Научно обоснованную возможность нормирования точности ТПТТ предоставляет информационная теория измерительных устройств [].

В результате введения энтропийной погрешности Δ_ε , теоретически позволяющей учесть закон распределения случайной погрешности через энтропийный коэффициент K_ε , оказалось возможным дать оценку точности преобразователя [136]:

$$A = \frac{x}{d} = \frac{2x}{2\Delta_a} = \frac{1}{2\gamma_\varepsilon} \quad (4.28)$$

где: x - текущее значение контролируемой величины; d - соответствующая значению x ширина зоны неопределенности; Δ_a - энтропийная абсолютная погрешность; γ_ε - соответствующая энтропийная относительная погрешность.

На практике удобно использовать энтропийное значение погрешности Δ_ε , которое связано со среднеквадратической погрешностью преобразования $\sigma_{опс}$ посредством энтропийного коэффициента K_ε

$$\Delta_\varepsilon = K_\varepsilon \cdot \sigma_{опс} \quad (4.29)$$

Количество измерительной информации I достаточно полно и обобщенно определяет точность ОПС, а энтропийная погрешность Δ_ε является мерой информационно-разрешающей способности преобразователя:

$$I = \ln \frac{x_2 - x_1}{2\Delta_\varepsilon} \quad (4.30)$$

где: $x_2 - x_1$ - диапазон преобразований.

Все вышеизложенное хорошо согласуется с современным подходом к понятию погрешности измерения как к неопределенности результата измерения и когда значение измеряемой величины с помощью преобразователя или прибора лежит на участке неопределенности на шкале прибора (на шкале возможных значений измеряемой величины).

Нелинейность статической характеристики вносит погрешность, максимальное значение, которое количественно равно степени нелинейности [130].

$$\gamma_{\text{нл}} = 0,5 \frac{U_{\text{вых.нл}} - U_{\text{вых.л}}}{U_{\text{вых.макс}} - U_{\text{вых.мин}}} \cdot 100\% \quad (4.31)$$

где $U_{\text{вых.нл}}$, $U_{\text{вых.л}}$ - нелинейные и линейные значения выходного сигнала ОПС.

Нелинейность статической характеристики является источником систематической погрешности ОПС и влияет на чувствительность преобразователя. Степень нелинейности зависит от диапазона преобразований и увеличивается с увеличением последней.

Степень нелинейности статической характеристики определяется отношением максимального отклонения по ординате характеристики ОПС от аппроксимирующей линейной (нормирующей) характеристики ко всему диапазону.

К основным общим приемам» которые применяются, для уменьшения степени нелинейности ОПС относятся: ограничения диапазона изменения входной величины, смещение начала диапазона, введение отрицательные обратных связей, использование дополнительных корректирующих устройств и другие.

Проанализируем зависимость степени нелинейности от параметров на примере наиболее характерной конструкции ОПС.

В ОПС нелинейность статических характеристик возникает из-за нелинейности распределения светового потока $\Phi_0(x)$, а также из-за нелинейности измерительных схем. Анализ распределения светового потока $\Phi_0(x)$ (рис. 4.4 а) показывает, что можно выделить два основных участка 1 и 2 (рис. 4.11), из которых участок 1 охватывает диапазон $L/d=8 - 10$ имеет достаточную большую чувствительность и нелинейность (рис. 4.11) не более $\gamma_{\text{нл}} < 0,1$, а участок 2 имеет меньшую чувствительность, но достаточно большой диапазон $10 \leq L/d \leq 30$ при этом степень нелинейности $\gamma_{\text{нл}} \leq 0,1$.

Используя выделенные поддиапазоны для дифференциальной измерительной схемы на рис. 4.12, приведены статические характеристики с оценкой степени нелинейности. Как показано на рис. 4.12 степени нелинейности не превышают значений $\gamma_{\text{нл}} < 0,1$.

Как показано в [110, 130], для уменьшения нелинейности статических характеристик преобразователей, можно использовать конструкторско-технологические приемы и структурные методы, заключающиеся в применений дополнительных корректирующих устройств, соответствующим образом включенных в цепь преобразователя.

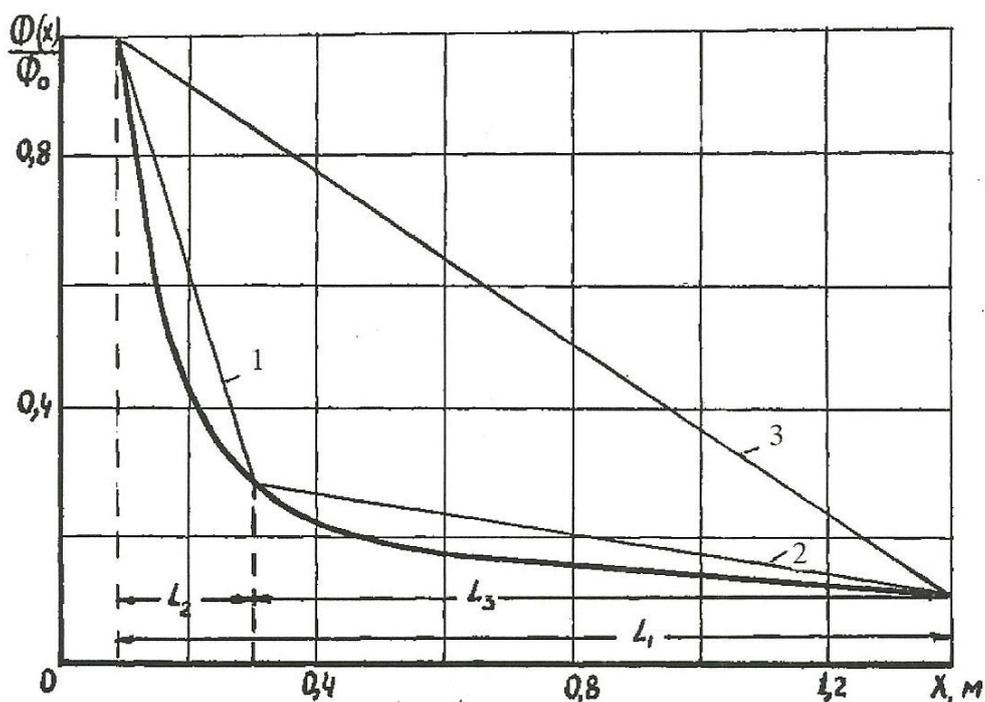


Рис. 4.11. Разделение статической характеристики на поддиапазоны 1 и 2.

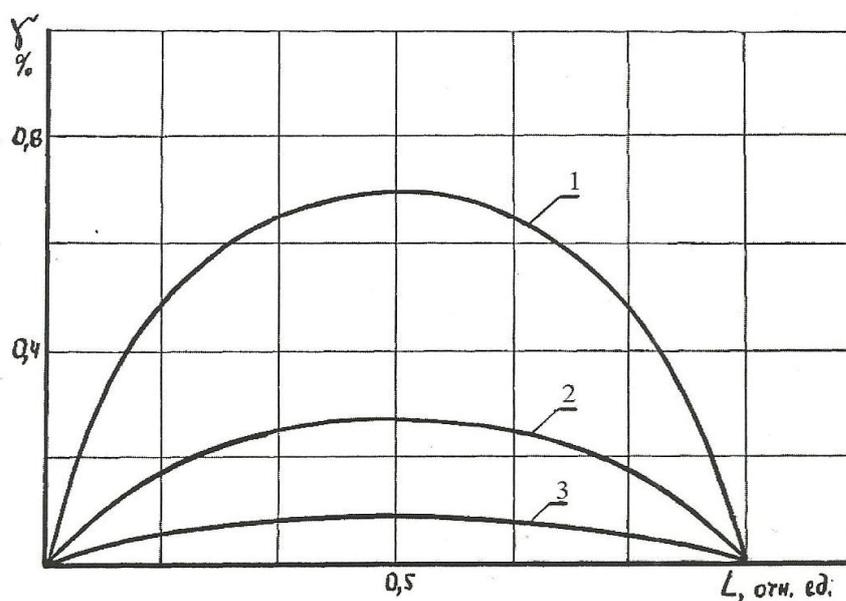


Рис. 4.12. Зависимость степени нелинейности статических характеристик от поддиапазонов.

Используя выделенные поддиапазоны для дифференциальной измерительной схемы на рис. 4.12, приведены статические характеристики с оценкой степени нелинейности. Как показано на рис. 4.12 степени нелинейности не превышают значений $\gamma_{\text{нл}} < 0,1$.

Как показано в [110, 130], для уменьшения нелинейности

статических характеристик преобразователей, можно использовать конструкторско-технологические приемы и структурные методы, заключающиеся в применении дополнительных корректирующих устройств, соответствующим образом включенных в цепь преобразователя.

Анализируя источники методической погрешности, следует указать, что кроме погрешностей общего характера (как нелинейность статической характеристики), несовершенство математических моделей в области каждого конкретного типа ОПС есть в специфические источники.

В области ОПС источником методических погрешностей может быть также инерционность приемника излучения, например, фоторезистора. Кроме того, среди ОПС погрешностями методического характера являются: наличие фоновых засветок и нарушение условий постоянства коэффициентов отражения ρ_1 и ρ_2 .

Динамические погрешности ОПС имеют существенное значение при их использовании в системах управления и при контроле быстро изменяющихся выходных величин. Динамическая погрешность ОПС зависит не только от динамических свойств приемника излучения, но и от характера изменения во времени входной величины $x_{вх}(\tau)$. Поэтому в зависимости от характера изменения входного сигнала для одних типов преобразователей целесообразно погрешность определять в частотной форме (при периодических сигналах), а для других используя апериодическую модель преобразователя.

Динамическая погрешность ОПС определяется как:

$$\Delta_a x_{\text{вых}}(\tau) = x_{\text{вых}}(\tau) - x_{\text{вых}}(\infty) \quad (4.32)$$

или

$$\Delta_a x_{\text{вых}}(\tau) = \frac{x_{\text{вых}}(\tau) - x_{\text{вых}}(\infty)}{x_{\text{вых}}(\infty)} \cdot 100\% \quad (4.33)$$

Для апериодической модели преобразователя с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} \quad (4.34)$$

при изменении входного сигнала скачком выходной сигнал имеет динамическую погрешность, уменьшающуюся с течением времени:

$$\Delta x_{\text{вых}}(\tau)_g = kx e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (4.35)$$

Или относительную погрешность

$$\bar{\Delta}x_{\text{вых}}(\tau) = e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (4.36)$$

Аналогично могут быть определены динамические погрешности для апериодических моделей второго и третьего порядков.

Возможны два подхода к уменьшению динамических погрешностей: конструктивный и использование электрических корректирующих устройств.

В ОПС кроме нелинейности статических характеристики и инерционности приемников излучения к методическим погрешностям следует отнести неполный учет зависимости коэффициента отражения ρ_1 ρ_2 материала полого световода от угла скольжения лучей, и явления дифракции.

4.5. Анализ надежности приборов и устройств в системах контроля очистки и использования производственных сточных вод

По целевому назначению различают расчеты надежности на стадии проектирования (прогнозирующие) и на стадии испытаний и эксплуатации (констатирующие). По принципиальным основам расчет надежности приборов и устройств системы контроля очистки производственных сточных вод (ПУСК) делится на элементный (аппаратурный) и функциональный (параметрический). По характеру учитываемых отказов (внезапных, постепенных) и с учетом характеристик отказов (внезапные, постепенные, полные, частичные, замыкание, обрыв и т.д.). Реальные конструкции ПУСК никогда строго не соответствуют некоторой одной модели расчета надежности и не все методы расчета надежности ПУСК одинаково хорошо разработаны [140].

Наиболее известным является расчет надежности отдельных элементов приборов, отказы которых носят внезапный характер и подчиняются нормальному закону распределения. При этом расчет разбивается на следующие этапы:

- составляют структурную схему расчета надежности на основании физических представлений о работе ПУСК;
- записывают уравнения расчета надежности на основании структурной схемы;

- в эти уравнения подставляют числовые значения показателей надежности элементов ПУСК;
- решая уравнения надежности, определяют показатели надежности ПУСК.

При такой методике расчета определяются вероятность работоспособного состояния ПУСК, равная сумме вероятности его работоспособных состояний (P_i):

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4.37)$$

Среднее время до первого отказа ПУСК равно сумме значений среднего времени работы в каждом из частных его работоспособных состояний, т.е.

$$T_{\text{ср}\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{\text{ср}i} \quad (4.38)$$

где n - множество работоспособных состояний элементов ПУСК. Значения T и P вычисляют в результате решения системы уравнений вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} -P_0(0) = -\lambda_{01} \cdot T_0 + \lambda_{10} \cdot T_1 \\ -P_0(0) = \lambda_{01} \cdot T_0 - (\lambda_{12} + \lambda_{10}) + \lambda_{21} \cdot T_2 \\ -P_k(0) = \lambda_{(k-1)k} \cdot T_{k-1} - (\lambda_{k(k+1)} + \lambda_{k(k-1)}) \cdot T_k + \lambda_{(k+1)k} \cdot T_{k+1} \\ -P_n(0) = \lambda_{(n-1)n} \cdot T_{n-1} \end{array} \right. \quad (4.39)$$

При определении среднего времени отказа, принимаются $P_0(0) = 1$, а при определении среднего времени, приходящегося на отказ, вероятность предотказного состояния принимается равной 1, а все остальные - равной нулю. При этом

$$T_i = \int_0^{\infty} P_i(t) dt \quad (4.40)$$

В основе расчета надежности ПУСК лежит анализ преобразования $X_{\text{вх}} \rightarrow U_{\text{эвых}}$, выполняемой преобразователем.

Надежность ПУСК рассчитывается в следующей последовательности:

1) Формируется вид функции $U_{\text{эвых}}(X_{\text{вх}})$, т.е. записывается уравнение преобразования $X_{\text{вх}}$ в $U_{\text{эвых}}$, устанавливающее связь между величинами цепей различной физической природы, используемых в конструкциях ПУСК, например:

$$U_{\text{вых}}(U_{\text{э2}}) = U_{\text{э1}} T_{\text{э1}} \Pi_{\text{э1}} * K(I_{\text{э1}}, I_i) * T_i \Pi_i * K(x_{\text{вх}}, (U_i, U_{\text{э2}})) x_{\text{вх}} \quad (4.41)$$

На основании этого уравнения составляется структурная схема расчета надежности ПУСК и рассчитывается надежность, обусловленная полными отказами элементов (P_i).

3) Дифференцируя уравнение работы ПУСК по каждому из параметров, определяются коэффициенты влияния этих параметров на $U_{\text{эвых}}$. В результате получается уравнение чувствительности ПУСК:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{dS}{dR_i} \Delta R_i \quad (4.42)$$

где $R = (\Pi_i, E_i, \dots, R_i)$ - первичные параметры, схемные функции распределенных цепей и коэффициенты межцепных связей.

Вероятность того, что $U_{\text{э2}}$ будет лежать в допустимых границах при нормальном законе распределения значения выходного сигнала, может быть определена как:

$$P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{U_{\text{э2}} - \Delta U_{\text{э2}}}^{U_{\text{э2}} + \Delta U_{\text{э2}}} e^{-\frac{(U - \bar{U})^2}{2\sigma^2}} dU_{\text{э2}}, \quad (4.44)$$

Эта вероятность и является надежностью ПУСК в соответствии с допустимыми отклонениями характеристики, т.е. в соответствии с заданной точностью.

При анализе надежности ПУСК удобнее рассматривать не $U_{\text{э2}}$, а чувствительность S , т.е. $S = U_{\text{э2}}/x_{\text{вх}}$, при этом

$$P(S) = \frac{1}{\sigma_S\sqrt{2\pi}} \int_{S - \Delta S}^{S + \Delta S} e^{-\frac{(S - \bar{S})^2}{2\sigma^2}} dS = \Phi(S_2) - \Phi(S_1), \quad (4.44)$$

где S - среднее значение чувствительности; σ - среднеквадратическое отклонение; ΔS - допустимое отклонение чувствительности.

Для ПУСК основным уравнением, используем при нахождении оптимальных размеров преобразователя, является выражение чувствительности

$$S_{\text{max}} = f(I, D, D_0, \rho_1, \rho_2, x_0) \quad (4.45)$$

Максимальное значение S_{max} является некоторой функцией следующих основных величин и параметров элементов ПУСК, входящих в (4.44). Разлагая (4.45) в ряд Тейлора в окрестности точки S_{max} , где все параметры принимают номинальное значение, и ограничиваясь линейными членами разложения, получим:

$$\begin{aligned}
S_{max} = S_{maxn} &+ \left(\frac{dS_{maxn}}{dI} \right)_{I=I_n} \cdot \Delta I + \left(\frac{dS_{maxn}}{dD} \right)_{D=D_n} \cdot \Delta D \\
&+ \left(\frac{dS_{maxn}}{dD_0} \right)_{D_0=D_{0n}} \cdot \Delta D_0 + \left(\frac{dS_{maxn}}{d\rho_1} \right)_{\rho_1=\rho_{1n}} \cdot \Delta \rho_1 \\
&+ \left(\frac{dS_{maxn}}{d\rho_2} \right)_{\rho_2=\rho_{2n}} \cdot \Delta \rho_2 + \left(\frac{dS_{maxn}}{dx_0} \right)_{x_0=x_{0n}} \cdot \Delta x_0
\end{aligned} \quad (4.46)$$

Величины и параметры $I, D, D_0, \rho_1, \rho_2, x_0$ считаем нормально распределенными значениями $I_n, D_n, D_{0n}, \rho_{1n}, \rho_{2n}, x_{0n}$ и дисперсиями $\sigma_I^2, \sigma_D^2, \sigma_{D_0}^2, \sigma_{\rho_1}^2, \sigma_{\rho_2}^2, \sigma_{x_0}^2$

Очевидно отклонения $\Delta I, \Delta D, \Delta D_0, \Delta \rho_1, \Delta \rho_2, \Delta x_0$ будут также распределены нормально с дисперсиями и нулевыми средними значениями.

Математическое ожидание S_{max} и дисперсия σ_s^2 определяются из выражения:

$$S_{max} = f(I_n, D_n, D_{0n}, \rho_{1n}, \rho_{2n}, x_{0n}). \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned}
\sigma_s^2 = \sigma_I^2 &+ \left(\frac{dS_{maxn}}{dI} \right)_{I=I_n}^2 \cdot \sigma_D^2 + \left(\frac{dS_{maxn}}{dD} \right)_{D=D_n}^2 \cdot \sigma_{D_0}^2 \\
&+ \left(\frac{dS_{maxn}}{dD_0} \right)_{D_0=D_{0n}}^2 \cdot \sigma_{\rho_1}^2 + \left(\frac{dS_{maxn}}{d\rho_1} \right)_{\rho_1=\rho_{1n}}^2 \cdot \sigma_{\rho_2}^2 \\
&+ \left(\frac{dS_{maxn}}{d\rho_2} \right)_{\rho_2=\rho_{2n}}^2 \cdot \sigma_{x_0}^2 + \left(\frac{dS_{maxn}}{dx_0} \right)_{x_0=x_{0n}}^2
\end{aligned} \quad (4.48)$$

Зная закон распределения, можно определить вероятность попадания величины S в зону допустимых отклонений (вероятность безотказной работы):

$$\begin{aligned}
P &= P\{t, S_{max} - \Delta S_{max} \leq S_{max} \leq S_{max} + \Delta S_{max}\} \\
&= \Phi\left(\frac{\Delta S_{2max}}{\delta_S}\right) - \Phi\left(\frac{\Delta S_{1max}}{\delta_S}\right)
\end{aligned} \quad (4.49)$$

Подставляя значения частных производных в (4.49), можно определить σ_s^2 . Таким образом, получаются исходные данные, связывающие S_{max} с выходным сигналом $U_{\Sigma 2}$. Зная количественные характеристики закона распределения $U_{\Sigma 2}$, определим для конкретных численных характеристик ПУСК с вероятностью 0,9989 возможные значения.

Надежность ПУСК в отношении постепенных отказов с учетом действующих факторов при погрешности выходной характеристики не

более $\pm 1,0\%$ и $\Delta S_{max}/S_{max}=0,45$:

$$P = \Phi\left(\frac{\Delta S_{2max}}{\delta_S}\right) - \Phi\left(\frac{\Delta S_{1max}}{\delta_S}\right) = \Phi\left(\frac{1}{0,45}\right) - \Phi\left(-\frac{1}{0,45}\right) = 0,976 \quad (4.50)$$

С учетом катастрофических отказов $P = 0,9989$, суммарная надежность составит:

$$P = P_{кат} * P_{нар} = 0,9989 * 0,9760 = 0,9739. \quad (4.51)$$

Была определена суммарная погрешность ПУСК при перемещении РЭ а основе структурной схемы с использованием положения информационной теории измерительных устройств.

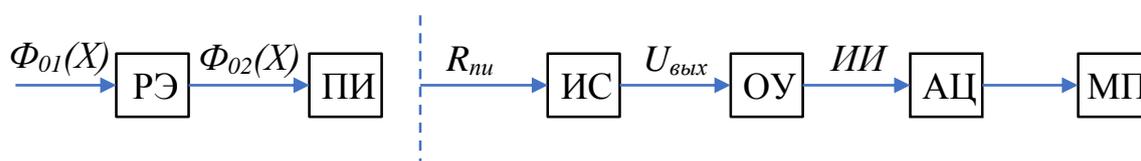


Рис. 4.13. Структурная схема системы контроля очистки производственных сточных вод.

где $\Phi_{01}(X)$ и $\Phi_{02}(X)$ - световой поток до и после рефлективного элемента; РЭ - рефлективный элемент; ПИ - приемник излучения; ИС - измерительная схема; ОУ - операционный усилитель; АЦП - аналого-цифровой преобразователь; МП - микропроцессор.

Аддитивная погрешность всего комплекта ПУСК обусловлена аддитивными погрешностями ИИ, ПИ, ИС и АЦП, а мультипликативная - колебаниями напряжения питания ИС и ОУ, а также зависимостью от температуры чувствительности усилителя ОУ и АЦП. Закон распределения погрешности ПИ можно принять нормальным с энтропийным коэффициентом $K_{пи} = 2,07$. Отсюда среднеквадратическое отклонение (СКО) равно:

$$\sigma_{пи} = \gamma_{пи} / K_{э} = 0,097\% \quad (4.52)$$

Аналогично для измерительной схемы ИС при нормальном законе распределения погрешности имеем:

$$\sigma_{ис} = 0,2 / 2,07 = 0,048\%. \quad (4.53)$$

СКО релейного устройства $\sigma_{py} = 0,021\%$. Аддитивная погрешность прибора будет образована суммой трех составляющих. Поэтому СКО

погрешности составит

$$\sigma_{\text{н}} = \sqrt{\sigma_{\text{ии}}^2 + \sigma_{\text{пи}}^2 + \sigma_{\text{ис}}^2 + \sigma_{\text{пу}}^2}. \quad (4.54)$$

Суммарные погрешности от колебаний температуры и колебаний напряжения независимы и поэтому складываются геометрически, т.е с СКО мультипликативной составляющей

$$\sigma_{\text{м}} = \sqrt{\sigma_{\text{н}}^2 + \sigma_0^2} = 0,096\%. \quad (4.55)$$

Результирующая погрешность ПУСК складывается из аддитивной и мультипликативной погрешности по правилам суммирования независимых погрешностей:

$$\sigma_{\text{к}} = \sqrt{\sigma_{\text{н}}^2 + \sigma_{\text{м}}^2} = \sqrt{0,089^2 + 0,096^2} = 0,13\% \quad (4.56)$$

Энтропийные коэффициенты суммируемых погрешностей $K_{\text{н}}=2,00$ и $K=2,04$ достаточно велика, а их СКО близки между собой ($\sigma_{\text{к}} = 0,089\%$ и $\sigma_{\text{м}}=13\%$), поэтому результирующее распределение достаточно близко к нормальному с $K=2,07$. Отсюда энтропийное значение погрешности данного ПУСК равно

$$\gamma_{\text{x}}=K_{\text{к}} \sigma_{\text{к}}=2,07* 0,13 = 0,269\%. \quad (4.57)$$

Экспериментально полученная полная погрешность ПУСК не превышает 0,3 %.

ГЛАВА 5. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

5.1. Микропроцессорное устройства для измерения и регистрации скорости и расхода воды в очистных сооружениях (МРВ)

МРВ измеряет среднюю за время наблюдения скорости течения водного потока в естественных и искусственных руслах. МРВ используется преимущественно при определении расхода воды в водостоках.

МРВ предназначена для преобразования скорости водного потока в последовательность замыкания магнитоуправляемого контакта. МРВ применяется как измерительный преобразователь при измерениях скорости и расхода водного потока в естественных и искусственных руслах.

МРВ предназначена для эксплуатации в воде при следующих условиях:

- при температуре воды от 1 до 30°С;
- при минерализации потока от 0 до 1000 г/м³;
- при мутности потока от 0 до 10000 г/м³.

Диапазон измерения скорости течения водного потока, м/с:

- 1) с лопастным винтом диаметром 120 мм - от 0,06 до 5,00;
- 2) с лопастным винтом диаметром 70 мм - от 0,15 до 5,00.

Соотношение между частотой замыкания магнитоуправляемого контакта и частотой вращения лопастного винта 1:1.

Ток коммутируемый магнитоуправляемым контактом на активной нагрузке от $5 \cdot 10^{-6}$ до 0,03 А.

Напряжение постоянного тока, коммутируемого магнитоуправляемым контактом от $5 \cdot 10^{-2}$ до 36 В.

Угол рассогласования между направлением потока и осью вращения лопастного винта в горизонтальной плоскости при установке вертушки со стабилизатором на вертлюге 5 град.

МРВ имеет номинальную градуировочную зависимость, выражаемую формулой

$$V=a+bn,$$

где, V – измеряемая скорость течения, м/с; a – коэффициент, м/с; b – коэффициент, м; n – частота вращения лопастного винта, об/с.

Предел допускаемой основной относительной погрешности δ , % не превышает значений, вычисляемых по формулам:

1) для МРВ с лопастным винтом диаметром 120 мм

$$\delta = \pm [0,015 + 0,002 \left(\frac{V_B}{V} - 1 \right)] \cdot 100;$$

2) для МРВ с лопастным винтом диаметром 70 мм

$$\delta = \pm [0,015 + 0,004 \left(\frac{V_B}{V} - 1 \right)] \cdot 100$$

где, V_B - верхний предел измерения скорости течения, м/с; V - измеряемая скорость течения, м/с.

Функция влияния угла отклонения продольной оси МРВ на величину измеренной скорости – косинусоидальная.

Принцип действия МРВ основан на вращении лопастного винта под воздействием набегающего потока воды. Скорость вращения лопастного винта и скорость потока воды связаны функциональной зависимостью. Вращение лопастного винта преобразовывается в частоту замыкания магнитоуправляемого контакта.

МРВ состоит из корпуса и сочлененных с ним ходового механизма и преобразователя. МРВ работает следующим образом. При вращении лопастного винта под воздействием потока воды вращается и жестко связанная с ним втулка. При этом в результате взаимодействия магнита, установленного во втулке первым со вторым магнитом, и магнитоуправляемым контактом, происходит периодическое, один раз за один оборот, замыкание последнего. Частота замыкания пропорционально скорости течения потока.

На измерительной плате расположены контрольные точки, с помощью которых обеспечивается съём электрических сигналов таймера на 60 или 100 с, а также нормированных сигналов, поступающих от вертушки.

На лицевой панели вычислителя размещены: разъем для подключения сигнального провода вертушки, тумблер отключения вертушки, цифровое табло, переключатель режимов работы, кнопка «ПУСК», кнопка «ИНД», сигнализатор режима измерения, сигнализатор МРВ. С помощью переключателя, расположенного на задней панели, обеспечивается смена коэффициентов для вертушек с лопастными винтами 120 или 70 мм.

Цифровое табло служит для отображения информации, получаемой с помощью МРВ, а именно, данных об измеренной скорости течения, количество оборотов лопастного винта вертушки, а также о контрольном числе, свидетельствующем об исправности вычислителя. В режиме измерения цифровое табло, с целью уменьшения потребления питания включается на период времени, равный 5 с.

Переключатель режимов работы обеспечивает выключения МРВ работы прибора в режиме контроля К, в режиме измерения при длительности периода осреднения скорости течения 100 или 60 с, а также в режиме счета количества сигналов «ОБ2», поступивших от вертушки.

С помощью кнопки «ПУСК» обеспечивается запуск МРВ с помощью кнопки ИНД возможность принудительной индикации показаний на цифровом табло в любой момент времени в процессе измерения, а также по окончании его после 5 секундного включения цифрового табло.

Сигнализатор режима измерения выполнен в виде светодиода, включающегося после нажатия кнопки «ПУСК» и отключающегося после окончания измерения по истечении 60 или 100 с.

Сигнализатор работы МРВ выполнен в виде двух светодиодов, чередования включения которых свидетельствует о функционировании вертушки.

Способ ввода коэффициентов «а» и «b» в схему вычислителя.

Определение индивидуальной градуировочной характеристики МРВ производитель согласно методике поверки: «Измеритель скорости течения ИСТ 1-0,06/120/70», полученные значения коэффициентов «а» и «b» уравнения $v = a + bn$ вводятся в электрическую схему вычислителя следующим образом:

- распайка коэффициентов «а» и «b» осуществляется на колодках №1 и №2 соответственно для вертушки с лопастными винтами 120 и 70 мм;
- коэффициенты «а» и «b» задаются в двоично-десятичном коде с помощью переключателей, распаянных на разъеме X10, целая часть и десятые доли заданы постоянными, изменяются только сотые и тысячные доли.

Коэффициенту «а» соответствует следующая группа контактов разъема X10 (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1.

Контакт	Разряд
24	1 разряд тысячных долей
20	2 —»—
18	3 —»—
22	4 —»—
30	1 разряд сотых долей
26	2 —»—
28	3 —»—
32	4 —»—

Коэффициенту «*b*» соответствует следующая группа контактов разъема X10 (см. табл. 5.2).

Таблица 5.2.

Контакт	Разряд
6	1 разряд тысячных долей
4	2 —»—
2	3 —»—
8	4 —»—
14	1 разряд сотых долей
12	2 —»—
10	3 —»—
16	4 —»—

Пример:

Логическая «1» подведена к следующим контактам разъема X10: 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31.

Логический «0» подведен к следующим контактам разъема X10: 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15.

На колоде 1 распаяны коэффициенты: $a = 0,099$ $b = 0,199$.

В двоично-десятичном коде они будут иметь вид:

«*a*» - 10011001; «*b*» - 10011001, колодка 1 распаивается следующим образом: к контактам (6, 8, 14, 10, 22, 30, 32) разъема X10 подводится уровень логический «1» (контакт 31), а к контактам (2, 4, 10, 12, 18, 20, 26, 28) разъема X10 подводится уровень логический «0» (контакт 1).

На колоде 2 распаяны коэффициенты:

$$a = 0,066$$

$$b = 0,166.$$

В двоично-десятичном коде они будут иметь вид:

«*a*» - 01100110; «*b*» - 01100110, колодка 2 должна быть распаяна следующим образом: к контактам (6, 8, 14, 16, 22, 14, 30, 32) разъема X10 подводится уровень логической: «0» (контакт 1); к контактам (2, 4, 10, 12, 18, 20, 26, 28) разъема X10 подводится уровень логический «1» (контакт 31).

5.2. Автоматическая многофункциональная система, контроля и регистрации химического состава водных сред

Аналитические методы, базирующейся на использовании ионоселективных электродов (ИСЭ), позволяет проводить непосредственное определение катионов и анионов. К числу наиболее распространенных ионов, определяемых при помощи ИСЭ, относятся ионы натрия, калия, кальция, фторид, хлорид нитрат-, сульфид- ионы. Ионометрия отличается от других физико-химических методов прежде всего простотой метода. Анализируемая жидкость может быть окрашенной, вязкой, непрозрачной и содержащий взвешенные частицы.

Иономер предназначен для длительной регистрации в автономном режиме показателей химического состава водных сред в полевых условиях, с использованием в качестве датчиков ИСЭ, датчика температуры и датчика удельной электропроводности.

Иономер может применяться для контроля химического состав промышленных сточных вод и качества вод технологических процессов в различных областях народного хозяйства.

Иономер может работать с любыми видами ИСЭ, температурными датчиками, датчиком электропроводности.

Иономер может осуществлять дистанционный контроль измерений анализируемой жидкости длительное время без участия оператора.

Обработка результатов измерений производится вручную или автоматически с помощью ЭВМ.

Иономер используется автономно со встроенным батарейным питанием +4,5; +9; -9 В.

Технические данные

- Иономер измеряет ЭДС, создаваемую ИСЭ, в диапазоне от 0 до ± 2000 мВ;
- Приведённая погрешность измерения ЭДС – 0,2%;
- Иономер измеряет температуры анализируемой жидкости в диапазоне от 0 до 150,0 °С с точностью до 0,5%;
- Иономер измеряет удельную электропроводность от 0 до 0,2 См·см, в шести диапазонах: от 0 до 0,002; от 0 до 0,02; от 0 до 0,2; от 0 до 2; от 0 до 20 и от 0 до 200 мСм·см;
- Приведённая погрешность измерения удельной электропроводности во всех диапазонах не более 1%;
- Напряжение питание иономера составляет +4,5 В, +9 В, -9 В;
- Источник питания состоит из 12 элементов типа 373;
- Потребляемая мощность составляет не более 1 Вт;
- Продолжительность автономной работы от одного комплекта

- элементов типа 373 составляет не менее 700 часов;
- Время измерения сигнала с одного датчика в таймерном режиме составляет 2 мин;
 - Цикл опроса всех датчиков 15 или 60 мин, непрерывно;
 - Время поиска установившегося значения – 40 с;
 - Ёмкость памяти регистрирующего устройства 4095 слов;
 - Регистрирующий блок может быть удален от иономера на расстояние до 20 м для осуществления дистанционного контроля;
 - Контрольное устройство измеряет ЭДС, создаваемого ИСЭ в диапазоне от 0 до + 1999 мВ;
 - Точность измерения составляет – 0,2 %.

Принцип действия прибора

Иономер представляет собой многофункциональный цифровой полевой прибор (см. структурную схему на рис. 5.1), имеющий выход для информационной связи с другими системами.

Определение концентрации X – ионов производится с помощью стандартных растворов с известной концентрацией. После измерения ионной силы стандартных растворов производится измерение в растворе с неизвестной концентрацией X – ионов. Для учёта разницы условий измерений в стандартном и неизвестном растворах фиксируется температура и удельная проводимость. Для уменьшения погрешностей измерений при изменении внешних климатических условий в измерительном блоке используется авто коррекция измерительного тракта по эквивалентам чувствительных элементов, а также производится автоматический поиск установившегося значения потенциала.

Измерительный блок преобразует входной сигнал в числоимпульсный код. Который по линии связи подаётся в регистрирующий блок. Полученная информация индицируется цифровым индикатором и записывается в память. При отключении питания информация, записанная в памяти, сохраняется.

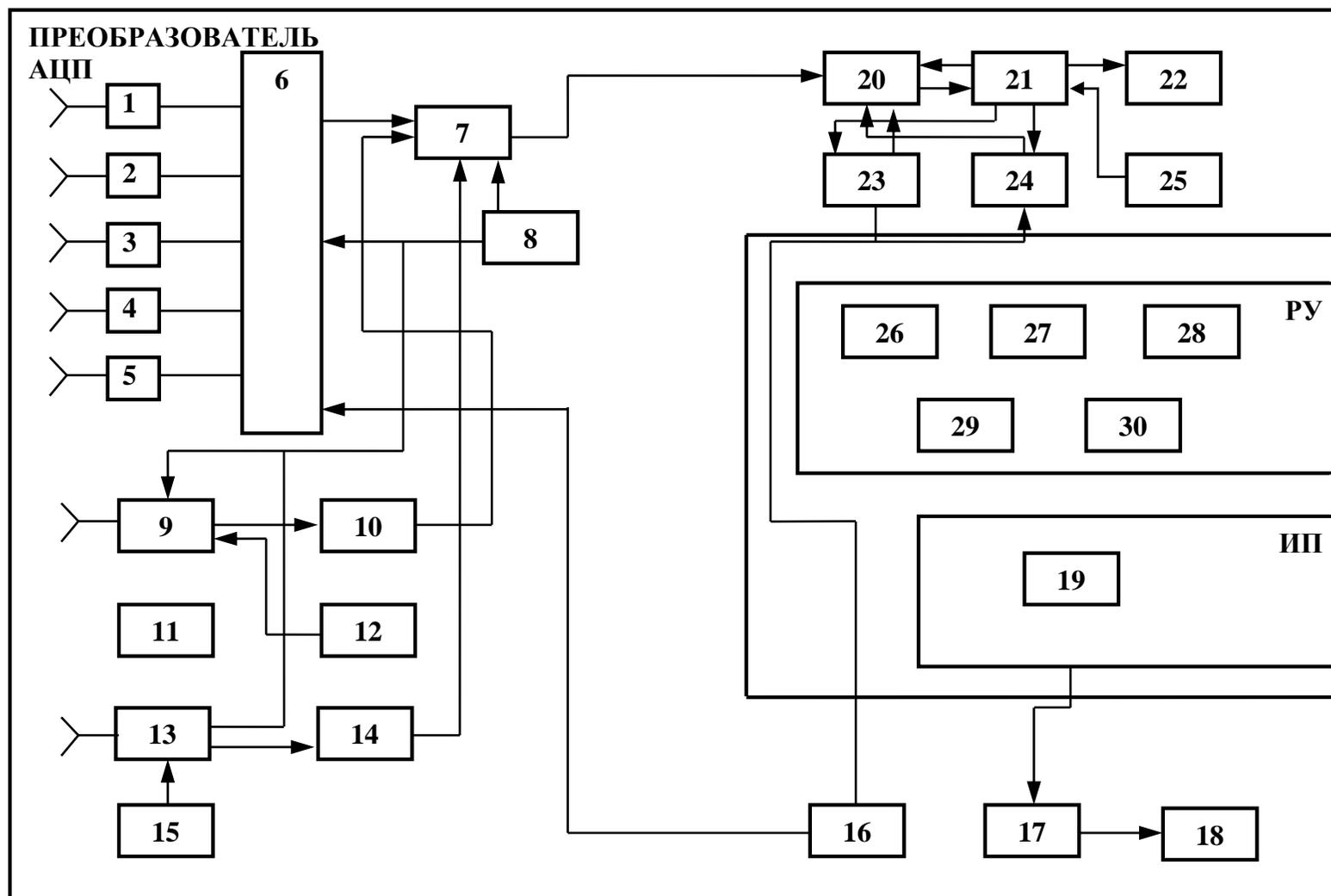


Рис. 2.4 Структурная схема иономера.

где 1-5 – Согласующие повторители, 6 – Коммутатор 1, 7 – Коммутатор 2, 8 – Устройство выбора датчиков, 9 – Коммутатор 3, 10 – Преобразователь температуры в напряжение, 11-12 – Эквиваленты температурного датчика при 0 °С и 100 °С, 13 – Коммутатор 4, 14– Преобразователь электропроводности в напряжение, 15 – Эквиваленты датчика электропроводности для 6 диапазонов, 16 – Источник опорных напряжений, 17 – Коммутатор питания, 18 – Устройство контроля питающих напряжений, 19 – Блок питания, 20 – АЦП, 21 – Схема управления 1, 22 – Согласующее устройство, 23 – ЦАП 0, 24 – Цап 1, 25 – Таймер, 26 – Согласующее устройство 2, 27 – Устройство управления ЗУ, 28 – Запоминающее устройство. 29 – Источник гарантийного питания, 30 – 9 разрядный индикатор.

Калибровка ИСЭ с помощью контрольного устройства.

Рабочий электрод и электрод сравнения подключается к разъёмам. Электроды опускается в стакан со стандартным раствором и нажатием кнопки включается измерение. Результат отображается на индикаторе. По нескольким стандартным раствором строится калибровочный график для каждого электрода. Концентрация ионов определяется по этим графикам.

Установить штатив в направляющую на корпусе иономера на необходимую высоту и зафиксировать гайкой.

Установить требуемое для измерений количество измерительных электродов в крышке стакана в специальных зажимах.

При необходимости установит один из стаканов в зависимости от условий измерений.

Стойку крышки стакана закрепить винтом в специальном отверстии штатива.

Электроды соединяются ионоселективные каждый с одним из четырёх разъемов под цифрами “1” ... “4”, электрод сравнения с разъемом под цифрой “0”, датчик температуры – с “6 t” и датчик удельной электропроводности – с разъемом под цифрой “5”. Включить тумблеры 1 в соответствии с подключенными датчиками.

Соединить измерительный и регистрирующий блоки, для чего вилки кабеля зафиксировать в розетках “РЕГ” на передних панелях этих блоков.

Соединить вилку от блока питания с розеткой “ПИТ” на передней панели измерительного блока.

Порядок работы

1. Ионмер имеет три режима работы во времени: непрерывное измерение-включено кнопка “0” таймера на передней панели измерительного блока; измерение через 15 мин (опрос всех датчиков-электродов через 15 мин) - включена кнопка “15” таймера; измерение через 60 мин (опрос всех датчиков через один час) включена кнопка “60” таймера.
2. Ионмер имеет шесть диапазонов измерения удельной электропроводности:
 - От 0 до 0,002 мСм ·см – включена кнопка “ $3 \cdot 10^{-3}$ ” выбора диапазона;
 - От 0 до 0,02 мСм ·см – кнопка “ $2 \cdot 10^{-2}$ ”;
 - От 0 до 0,2 мСм ·см – кнопка “0,2”;
 - От 0 до 2 мСм ·см – кнопка “2”;
 - От 0 до 20 мСм ·см – кнопка “20”;
 - От 0 до 200 мСм ·см – кнопка “200”.
3. Ионмер имеет режим поиска установившихся значений. При включенном тумблере “УЗ” повышается точность измерения, и информация об измерении поступит в регистрирующий блок и на индикацию только при установившемся значении. В противном случае информация об измеренной величине не поступит.
4. Ионмер имеет три режима работы: коррекция “1”, коррекция “0” и измерение. Индикация о режиме работы выведена на переднюю панель измерительного блока. При нажатии кнопки “ИНД” светится один из индикаторов “К0”, “К1”, “ИЗМ”, а также индицируется номер датчика (электрода) и горят светодиоды “V⁺” и “V⁻”, которые свидетельствуют о нормальном состоянии элементов блока питания. В случае, когда при нажатой кнопке включения индикации “ИНД” светодиоды “V⁺” и “V⁻” не горят, необходимо заменить элементы или восстановить контакт между элементами в блоке питания.
Нажатием кнопки “Пуск” ионмер включается в работу.
При работе в таймерном режиме перед началом измерений необходимо зафиксировать реальное время момента нажатия кнопки “Пуск”.
5. Регистрирующий блок ионмера работает в двух режимах:
 - а) Запись – информация с измерительного блока записывается в память и при включенном тумблере “ИНД” выводится на индикатор;
 - б) Считывание - информация, записанная в процесс измерения в память, обрабатывается вручную, либо через согласующее

- устройство с помощью ЭВМ.
6. Для обработки информации вручную на передней панели имеется две кнопки, обозначенные символами “=>” и “+1”.
- Кнопка “+1” служит для последовательного считывания информации от начала до конца.
- Кнопка “=>” служит для быстрого поиска нужной информации.

Расшифровка результатов измерений.

По полученным значениям ЭДС электродов, температуры, удельной электропроводности определяется концентрация вещества в растворе. В таймерном режиме определяется реальное время измерения. На цифровом табло фиксируется номер измерения от 0 до 4095, знак получаемой величины и непосредственно результат измерения. Младший значащий разряд (м.з.р.) при измерении ЭДС соответствует 1 мВ.

При измерении температуры м.з.р. соответствует 0,1°C, а при измерении удельной электропроводности значение м.з.р. зависит от диапазона, например, на диапазоне 0,2 мСм·см.- м.з.р. равняется 0,0001 мСм·см. Наличие светящихся точек на цифровом табло указывают, что за время 2 мин, отведённые на один датчик, не произошло измерения (неопределенный результат).

Например, на индикаторе регистрирующего устройства имеется результат: 2023-0257. Первые четыре цифры указывают номер измерения (№ 2023), знак “-” – знак, полученной величины, и последние четыре цифры – непосредственно результат измерения.

В случае, когда нужно знать время измерения и номер датчика данного результата, рассчитывают следующим образом:

Время измерения T_u , сутки, часы, мин.

$$T_u = T_o + T_u + T_d,$$

где T_o – время включения кнопки “Пуск”;

T_u – время целого количества циклов (N) измерения;

$$T_u = t \cdot N \quad (t = 15 \text{ или } 60 \text{ мин}), \quad N = \frac{Nb - No}{n};$$

N_b – номер выбранного измерения; N_o – начальный номер измерения;

N – Количество датчиков (электрод сравнения не учитывается);

T_d – время неполного цикла, $T_d = t_2 \cdot N_d$;

$t_2 = 2$ мин – время работы одного датчика;

N_d – остаток от деления N (номер датчика).

Например, 2023-0257

$$N_b = 2023, \quad N_o = 183, \quad T = 15 \text{ мин} = 0,25 \text{ ч.}$$

$N = 6$ датчиков

$$T_o = 5 \text{ раз } 1988 \text{ } \approx 8 \text{ час } 10 \text{ мин}$$

$T_{ц} = 0,25 \cdot \frac{2023-183}{6} = 0,25 \cdot 306 = 76,5$ (ч) или 3 сут 4 ч 30 мин,
остаток от деления 4, т.е. номер датчика $N_{д}=4$.

$$T_{д} = 2 \cdot 4 = 8 \text{ мин}$$

$T_{и} = 5 \text{ сут } 8 \text{ ч } 10 \text{ мин} + 3 \text{ сут } 4 \text{ ч } 30 \text{ мин} + 8 \text{ мин} = 8 \text{ сут } 12 \text{ ч } 48 \text{ мин}$,
т.е. в это время произошло измерение анализируемой жидкости четвертным датчиком, показание составляет – 257 мВ.

5.2.1. Портативный микропроцессорный многофункциональный измеритель рН и температуры

Портативный микропроцессорный рН/мВ/°С – метр предназначен для контроля качества воды по значению рН, температуры и окислительно-восстановительного потенциала (Еh). Наличие режима измерения мВ позволяет работать с ион-селективными электродами. Прибор может использоваться как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Технические характеристики

Характеристики	Измеряемые величины		
	рН	Еh, mV	Температура, °С
Диапазон измерения	0 ÷ 14	0 ÷ +1999	0 ÷ 100
Разрешение	0,01	1	0,1
Погрешность	±0,04	±3	±0,5
Ресурс непрерывной работы, час	50		

Порядок работы

ON/OFF – для включения и выключения прибора;
 рН – режим измерения “рН”;
 mV – режим измерения “мВ”;
 °С – режим измерения температуры. При отключенном термодатчике на дисплее горит значение “20°С”, которое можно подвести с помощью внутреннего винта;
 STD – для калибровки опорной точки рН;
 SLOPE – для калибровки наклона градуировочной прямой при рН измерениях.

Проведение измерений рН

Подсоедините электрод и термодатчик к прибору.

Убедитесь, что прибор был предварительно откалиброван по рН и температуре.

Снимите защитный колпачок с рН-электрода и погрузите электрод и термодатчик в исследуемый раствор. Перемешайте и подождите одну минуту, чтобы показания стабилизировались.

Нажмите кнопку рН/mV/°C для входа в режим измерения соответственно рН, мВ или температуры. Показания рН компенсируются при этом автоматически по температуре. При отключенном термодатчике измеренные значения рН будут корректироваться по температуре 25 °С.

Проведение Red/Ox - измерений

С помощью прибора можно измерять величину окислительно-восстановительного потенциала (ОВП). Для выполнения этих измерений необходимо выбрать оптимальный ОВП-электрод.

Так же, как измерения рН позволяют численно выразить кислотность или щелочность вещества, измерения окислительно-восстановительного потенциала обеспечивают количественную оценку окислительной или восстановительной способности любого раствора [97].

Для того чтобы правильно провести Red/Ox – измерения, необходимо выполнить следующие условия:

- поверхность электрода должна быть чистой и гладкой;
- поверхность электрода необходимо подвергнуть предварительной обработке, которая зависит от окислительных или восстановительных характеристик исследуемого раствора.

Перед тем как приступать к химической обработке электрода, желательно тщательно очистить платиновую поверхность:

- выдержать в течение непродолжительного времени в скипидаре;
- сполоснуть большим количеством воды;
- отполировать (в случае необходимости) мягкой шкуркой, обращая внимание на то, чтобы не поцарапать поверхность, и смывая после очистки следы этих загрязнений.

Поскольку потенциал системы Pt/PtO зависит от рН, предобработка электрода зависит от значений рН и Red/Ox – потенциала исследуемого раствора.

Как правило, если значение мВ, соответствующее измеренному рН, выше величины в приведенной таблице 5.3, необходима окислительная обработка, в противном случае требуется восстановительная обработка.

Таблица 5.3.

mV	990	920	860	800	740	680	640	580	520	460	400	340	280	220	160
pH	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Восстановительная предобработка: погружение на 5 минут в раствор сульфата железа (HI 7091L).

Окислительная предобработка: погружение на 5 минут в раствор гипохлорита натрия, нейтрализованного до pH 7 с помощью 1M соляной кислоты (HI 7092L).

Если не провести предварительную обработку электрода, то время отклика будет значительно больше.

При работе с заполняемыми электродами необходимо поддерживать определенный уровень внутреннего электролита (не меньше, чем 0,5 см от нижнего края заливного отверстия) и заливать их по мере необходимости рекомендуемым раствором (HI 7071L).

При хранении кончик электрода необходимо поддерживать во влажном состоянии и беречь от механических воздействий, которые могут вызвать повреждение места соединения "стекло/платина". Во избежание дегидратации и/или повреждения чувствительного шарика электрода, заполните защитный колпачок раствором для хранения (HI 70300L) и наденьте его на кончик электрода.

Калибровка pH

Первичная подготовка:

1. Налейте небольшие количества буферных растворов с pH 7,01 (HI 7007) и pH 4,01 (HI 7004) в чистые сосуды. Если Вы работаете в щелочной области, пользуйтесь буферным раствором с pH 10,01 (HI 7010).
2. Для точной калибровки используйте два отдельных сосуда для каждого буферного раствора:
 - для промывки электрода,
 - для калибровки.

В этом случае загрязнение сводится к минимуму.

3. Если Вам необходимо провести калибровку по NBC - стандартам, пользуйтесь буферами с pH 6,86 (HI 7006) и pH 9,18 (HI 7009).

Процедура калибровки:

1. После подключения pH-электрода и термодатчика включите прибор.
2. Погрузите термодатчик в один из сосудов и нажмите кнопку "°C" для входа в режим измерения температуры. Подождите, пока показания температуры стабилизируются, и заметьте температуру буфера.

3. Нажмите кнопку "pH", сполосните и погрузите pH-электрод в буфер с pH 7,01. Перемешайте и подождите одну минуту. Подведите винт "STD" в

нижнем левом углу на передней панели, пока на дисплее не появится значение рН при отмеченной температуре (см. табл. 5.3).

4. Сполосните и погрузите рН-электрод в буфер с рН 4,01 или рН 10,01, перемешайте и подождите одну минуту. Подведите винт “SLOPE” в правом нижнем углу передней панели прибора, пока на дисплее не появится значение рН, соответствующее отмеченной температуре (см. табл. 5.4).

5. Калибровка рН завершена.

Таблица 5.4.

Температура		рН				
°C	°F	4,01	6,86	7,01	9,18	10,01
0	32	4,01	6,98	7,13	9,46	10,32
5	41	4,00	6,995	7,10	9,39	10,24
10	50	4,00	6,92	7,07	9,33	10,18
15	59	4,00	6,90	7,04	9,27	10,12
20	68	4,00	6,88	7,03	9,22	10,06
25	77	4,01	6,86	7,01	9,18	10,01
30	86	4,02	6,85	7,00	9,14	9,96
40	104	4,04	6,84	6,98	9,07	9,88
50	122	4,06	6,83	6,98	9,01	9,82
60	140	4,09	6,84	6,98	8,97	9,77
70	158	4,12	6,85	6,99	8,93	9,75

Перекалибровку рН-метра необходимо проводить в следующих случаях:

- при замене рН – электрода;
- по прошествии месяца с момента последней калибровки;
- после использования электрода в агрессивных средах;
- после очистки электрода и замены электролита в электроде сравнения;
- при необходимости максимальной точности измерений.

5.3. Автоматизированная система потенциметрического титрования

Автоматизированная система потенциметрического титрования (АСПТ) предназначена для проведения полуавтоматического потенциметрического титрования в комплекте с бюреткой и рН-метром – милливольтметром, имеющим диапазон от минус 1 до плюс 14 рН (от

± 100 до ± 1400 мВ) при выходном напряжении от 0 до 2 В.

АСПТ имеет гальванически развязанный выход напряжением 10 В для подключения автобюретки и других исполнительных механизмов. Имеет выход для согласования работы в рамках агрегатированной системы титровального оборудования с применением транскриптора и ЦПУ.

Технические характеристики АСПТ

№	Характеристики	Единицы измерения	Показатель
1.	Пределы установки конечной точки титрования	pH	-1 ÷ +14
		мВ	$\pm 100 \div \pm 1400$
2.	Диапазон установки зоны импульсной подачи раствора	pH	0 ÷ 5
		мВ	0 ÷ 500
3.	Время выдержки	с	5 ÷ 45
4.	Зона нечувствительности, приведенная к входу	мВ	не более 2
5.	Основная относительная погрешность титрования (в комплекте с pH-метром и бюреткой)	%	не более ± 1
6.	Сходимость результатов титрования	%	не более 0,5
7.	Потребляемая мощность	Вт	20

Функциональная схема установки для потенциометрического титрования приведена на рис. 5.2.

Напряжение U_x , пропорциональное ЭДС электродной системы, с выхода pH-метра-милливольтметра подается на вход автоматического титратора (прибор), где сравнивается с напряжением U_k , установленным на задатчике конечной точки титрования. Разность этих напряжений поступает на вход усилителя.

На выходе усилителя включено бесконтактное электронное реле, управляющее работой электромагнитного клапана. Клапан открывает или закрывает подачу титрующего раствора из сосуда в ячейку с титруемым раствором.

При $U_x = U_k$ реле отключает питание клапана, который, пережимая резиновую трубку, прекращает подачу титрующего раствора.

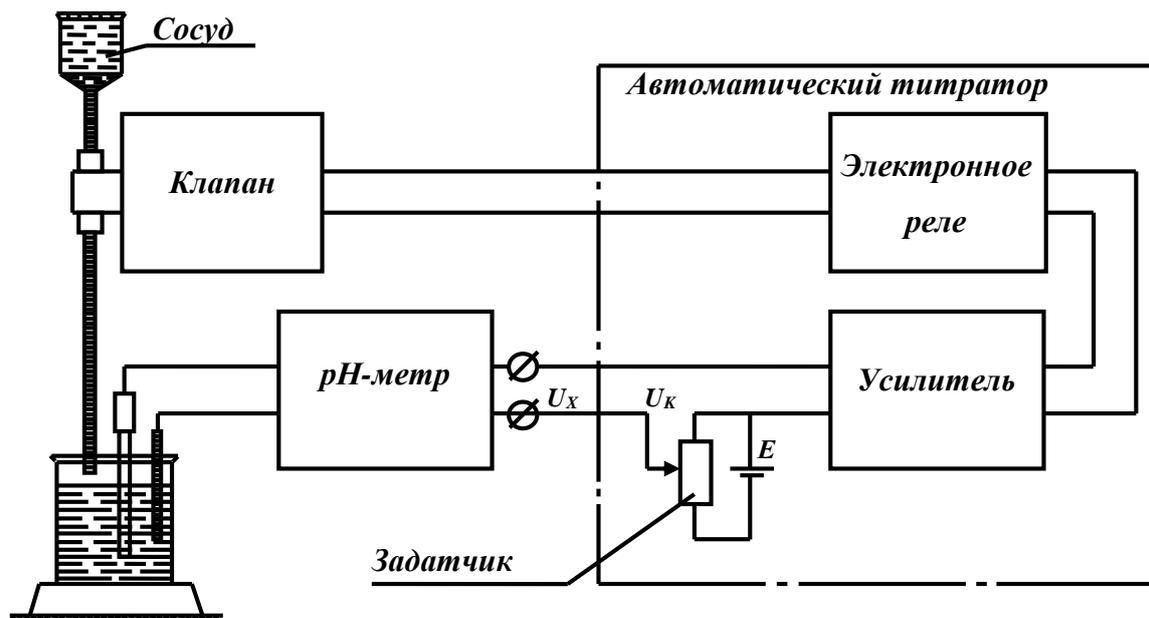


Рис. 5.2. Функциональная схема установки для потенциометрического титрования.

Подготовка прибора к работе

При длительных перерывах в работе, после переноски или транспортировки прибор необходимо проверить и при необходимости произвести установку нуля задатчика конечной точки титрования.

Общий вид установки для автоматического потенциометрического титрования приведен на рис. 5.3.

Рекомендуется рН-метр-милливольтметр устанавливать на блоке автоматического титрования. Справа от приборов устанавливается штатив и магнитная мешалка. Микробюретка со склянкой устанавливается справа от штатива.

Соедините гнезда «2V» рН-метра 1 с гнездами «ВХОД, 0...2V» блока автоматического титрования 2 кабелем, входящим в комплект автоматического титратора.

Укрепите на штативе 4 магнитную мешалку 5 и держатель электродов 7.

Магнитную мешалку можно устанавливать непосредственно на столе.

Заземлите рН-метр, прибор и магнитную мешалку.

Установите в держатель электродов вспомогательный 9 и измерительный 8 электрод и подключите их к соответствующим гнездам рН-метра-милливольтметра.

Проверьте уровень раствора хлористого калия во вспомогательном

электроде. Если электрод заполнен меньше чем на половину, в него следует к долить насыщенный при комнатной температуре раствор хлористого калия. Вспомогательный электрод установите так, чтобы нижний его конец был на 3—4 мм ниже шарика (или конца) измерительного электрода.

При титровании резиновая пробка вспомогательного электрода должна быть удалена. Залейте в стаканчик дистиллированную воду и погрузите в нее электроды.

Установите на штативе электромагнитный клапан 3 таким образом, чтобы он находился ниже крана 11 бюретки.

Выдвиньте задвижку на клапане, установите в паз резиновую трубку.

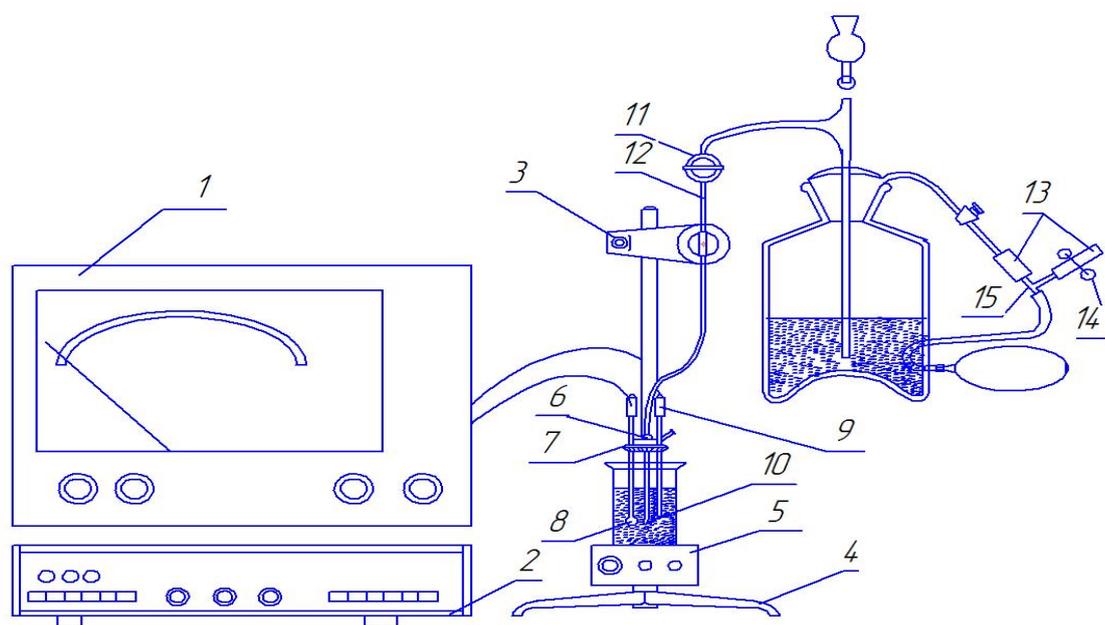


Рис. 5.3. Общий вид установки для потенциометрического титрования, где 1 — рН-метр-милливольтметр; 2 — блок автоматического титрования; 3 — электромагнитный клапан; 4 — штатив; 5 — мешалка; 6 — втулка резиновая; 7 — держатель электродов; 8 — измерительный электрод; 9 — вспомогательный электрод; 10 — дозирующая трубка; 11 — одноходовый кран; 12 — трубка резиновая Ø 2 мм; 13 — трубка резиновая Ø 4,5 мм; 14 — зажим; 15 — тройник.

Задвижку установите на место. Верхний конец резиновой трубки 12 наденьте на кран 11 бюретки. Нижний конец резиновой трубки наденьте на дозирующую трубку 10 и опустите ее в стакан для сбора раствора при промывке.

Залейте в склянку дистиллированную воду. Заполните микробюретку водой.

После заполнения склянки водой (или в дальнейшем раствором) во

избежание выскакивания микробюретки из склянки и ее повреждения при подкачивании воздуха в склянку необходимо бюретку закрепить на склянке резиновой трубкой 2x1,25, входящей в комплект.

Включите рН-метр и автоматический титратор.

Нажмите кнопку «РУЧН.» с и помощью ручки «ЗАДАННАЯ ТОЧКА» и кнопок «—1, УЗКИЙ», «4» и «9» добейтесь загорания лампочки «ПРОЦЕСС», при этом должен открыться клапан.

Подкачивая резиновыми мехами воду в микробюретку, промойте систему.

После окончания промывки слейте остатки воды из склянки и залейте в нее титрующий раствор.

Установите диапазон измерений рН-метра, на котором будет вестись титрование (широкий диапазон от минус 1 до плюс 14 рН или узкий диапазон с размахом 5 рН).

Титрование удобнее вести на широком диапазоне, для более точного титрования можно перейти на узкий диапазон.

Установите на задатчике «ЗАДАННАЯ ТОЧКА» значение конечной точки титрования.

При работе рН-метра на широком диапазоне значение конечной точки титрования определяется суммой значений, соответствующих нажатию кнопки, и показаний реохорда задатчика «ЗАДАННАЯ ТОЧКА». При работе рН-метра на любом из узких диапазонов с размахом 5 рН конечная точка титрования определяется как сумма значения начала диапазона рН-метра и установленного значения по шкале реохорда «ЗАДАННАЯ ТОЧКА». При этом кнопка «—1, УЗКИЙ» должна находиться в нажатом положении.

Установите кнопку «ВВЕРХ—ВНИЗ» в положение «ВВЕРХ» (отжата) или «ВНИЗ» (нажата) в зависимости от характера проводимого титрования. В положении «ВВЕРХ» ведется титрование раствора до более высоких значений рН. В положении «ВНИЗ» ведется титрование до более низких значений рН.

Ручкой «ВЫДЕРЖКА» установите необходимую величину выдержки.

Установите ручкой «ЗОНА» выбранную ширину зоны импульсной подачи. При титровании ширина зоны импульсной подачи раствора не должна быть равна нулю.

Промойте стаканчик, электроды и перемешивающий стержень дистиллированной водой. Залейте в стаканчик титруемый раствор и установите его на мешалку.

Объем раствора в стаканчике должен быть таким, чтобы шарик измерительного электрода полностью находился в жидкости.

Погрузите в стаканчик с титруемым раствором перемешивающий стержень.

Закрепите в держателе дозирующую трубку, опустив ее так, чтобы она не доставала до перемешивающего стержня.

Включите мешалку.

Начните титрование, нажав кнопку «ПУСК». Если титрование будет проводиться с автоматической блокировкой клапана и необходимой выдержкой, то нажмите кнопку «ВКЛ.».

При нажатии кнопки «ПУСК» должна загореться лампочка «ПРОЦЕСС» и начаться подача титрующего раствора.

Проведите пробное титрование и при этом отрегулируйте вращением регулировочного винта клапан, предварительно отвинтив винт-заглушку и стопорный винт. Клапан должен быть отрегулирован таким образом, чтобы под конец титрования раствор подавался малыми дозами во избежание перетитрования.

Отсчет количества титрующего раствора по бюретке следует производить по истечении установленной выдержки, т. е. после загорания лампочки «КОНЕЦ». Если блокировка клапана не была включена, то отсчет следует производить после того, как окончательно погаснет лампочка «ПРОЦЕСС».

После окончания титрования отожмите кнопку «ПУСК».

5.4. Микропроцессорный измеритель концентрации активного ила

Принцип работы измерителя оптической плотности поясняется функциональной упрощенной схемой, приведенной на рис. 5.4.

Датчик прибора построен по схеме двухканального автоматического оптически компенсированного фотометра с одним фотоприемником. Суспензия микроорганизмов непрерывно циркулирует через рабочий канал 13 кюветы. В эталонный канал 14 заливают питательную среду или дистиллированную воду. Изменение концентрации суспензии [в рабочей кювете вызывает разность интенсивностей световых потоков Φ и Φ_k , испускаемых источником 3. Световые потоки модулируются с частотой 400 Гц обтюратором 2, который вращается электродвигателем 1, проходят через спектральный светофильтр 4, фокусируются линзами 15 и попадают поочередно на светоприемник 16 — фоторезистор.

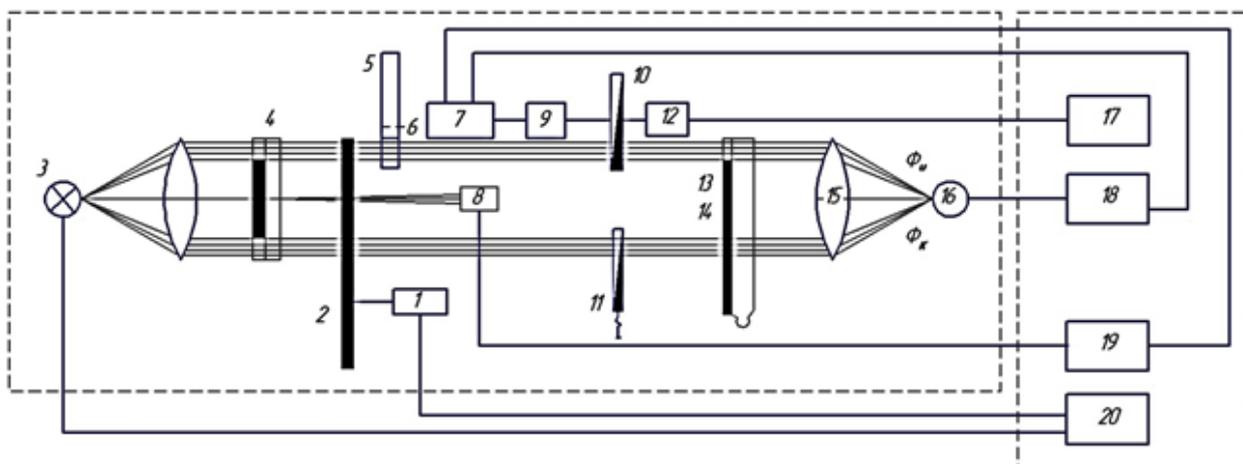


Рис. 5.4. Функциональная блок-схема измерителя оптической плотности активного ила.

На выходе светоприемника возникает периодический сигнал разбаланса, который проходит через усилитель 18 измерительного блока и поступает на обмотку управления асинхронного двухфазного двигателя 7. Двигатель с помощью редуктора 9 вращает измерительный клин 10 до тех пор, пока световые потоки не уравниваются в обеих кюветах. Напряжение на обмотку двигателя 7 подается с выхода из усилителя 19, источником входного сигнала которого служит вспомогательный светоприемник 8 — фотодиод. Сдвоенный потенциометр 12 датчика находится на одной оси с двигателем 7 и может быть связан электрически с показывающим прибором, шкала которого отградуирована в единицах оптической плотности или концентрации активного ила [105].

Штриховой оптический клин имеет линейную зависимость от угла поворота. Чтобы увеличить чувствительность фотометра, оптическая плотность клина выбрана равной $0-1D$. Широкий диапазон измерения величины D обеспечивается нейтральным светофильтром 6 плотностью $2D$ или D , который вводится с помощью переключателя 5. Таким образом, оптический диапазон фотометра составлен из двух поддиапазонов $0-1D$ и $1-2D$. Кроме того, для возможности измерения на наибольшем линейном участке функции $D(x)$ применены сменные кюветы с толщиной просвечиваемого слоя 0,5; 1; 2; 4 и 8 мм. Для подстройки нуля имеется компенсационный клин 11. Фотометр оборудован стабилизатором напряжения выходных цепей 17 и источником стабилизированного напряжения 20 для питания источника света, электродвигателей и усилителей.

Как известно, при измерении оптической плотности в видимом

участке спектра большое влияние на результаты могут оказать флуктуации цветности суспензии активного ила. Применение фоторезистора, имеющего явно выраженную нелинейность спектральной характеристики с пиком чувствительности в инфракрасной области, а также светофильтра (рис. 5.4), поглощающего излучение в видимом участке спектра, позволяет исключить указанное влияние. Это было проверено в лабораторных условиях на иловых смесях, культивируемых на различных субстратах (бутанол, ацетон и др.), а также на активных илах целлюлозно-бумажных производств.

На рис. 5.5 приведена корреляционная зависимость между концентрацией активного ила (станции аэрации целлюлозно-бумажного комбината), окисляющего сульфатный щелок, и его оптической плотностью для кювет с толщиной просвечиваемого слоя 2 и 8 мм и нанесены экспериментальные точки, полученные на этом же активном иле, но разбавленном сульфитным щелоком или водопроводной водой. Концентрация органических загрязнений в первых двух случаях ~ 200 мг БПКполн/л. Отклонение опытных точек от кривой регрессии невелико.

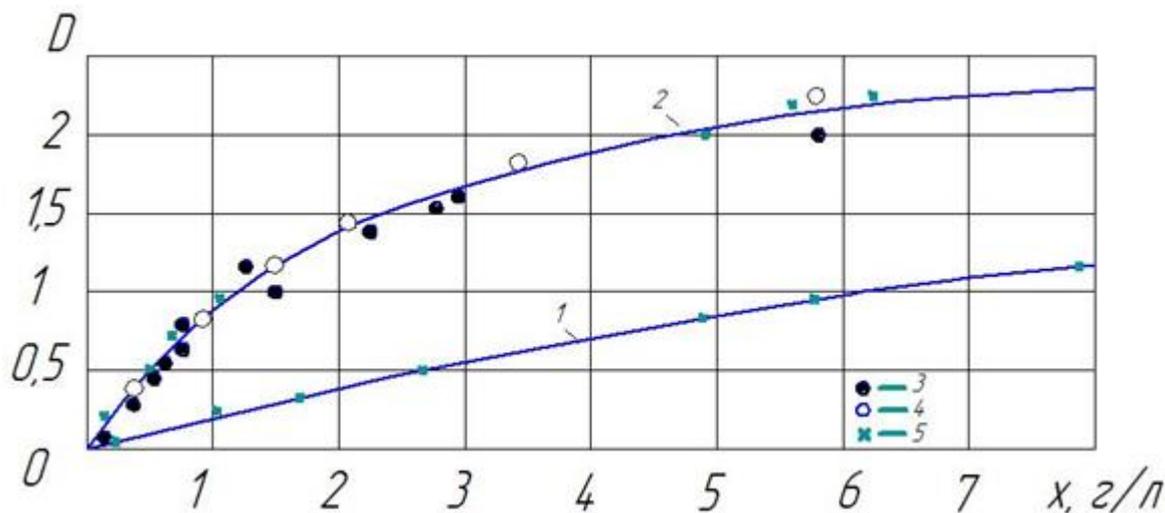


Рис. 5.5. Зависимость концентрации x от оптической плотности D активного ила, где 1 — в кювете $l=2$ мм; 2 — в кювете $l=8$ мм; 3 — опытные данные, полученные на активном иле, окисляющем сульфатный щелок; 4 — то же, разбавленном сульфитным щелоком; 5 — то же, водопроводной водой.

Кроме того, проведены исследования корреляционной зависимости между концентрацией загрязнений в фильтрованной иловой смеси и оптической плотностью активного ила. При

изменении концентрации загрязнений (при постоянной концентрации активного ила) от 20 до 600 мг БПКполн/л (как при сульфатном, так и при сульфитном щелоке) цвет иловой смеси изменялся от слабо окрашенного до темно-коричневого и черного. При этом оптическая плотность активного ила (даже при малой его концентрации) практически не зависит от цветности воды.

На основании результатов этих опытов можно утверждать, что оптическая плотность активного ила (при измерении ее в ИК-области спектра вышеописанным фотометром) зависит от концентрации микроорганизмов активного ила и не зависит от цветности окружающей жидкой среды.

Длительные исследования точности и стабильности измерения концентрации активного ила вышеописанным

Показания фотометра сравнивались с величиной сухого веса активного ила, определяемой по стандартной методике. На рис. 5.6 для кюветы с толщиной просвечиваемого слоя 4 мм приведены математические ожидания функциональной зависимости $D(x)$ для лабораторного активного ила, а также для активных илов разных станций аэрации. Величина приведенной оценки дисперсии, равная 0,12 г/л, удовлетворительна, что говорит о возможности использования измерителя в производственных условиях и в системах регулирования концентрации активного ила. Однако (как это видно из рис. 5.6) оптические свойства разных илов отличаются друг от друга весьма значительно. Следовательно, при использовании подобных измерителей необходима специальная тарировка их для каждой станции аэрации.

Известно, что при погружении приборов в жидкость с активным илом наблюдается их обрастание микроорганизмами. Помпа измерительной петли лабораторной установки обеспечивает циркуляцию иловой смеси через измерительную кювету примерно 0,5—1 л/мин в зависимости от концентрации активного ила. При этом обеспечивается устойчивость показаний, а также почти полностью отсутствует зарастание стенок кюветы микроорганизмами активного ила [138].

Передаточная функция фотометра (для синтеза САР и исследования динамики процесса) имеет вид:

$$W(P) = \frac{M}{(T_p+1)^2} \quad (5.1)$$

где M — коэффициент передачи фотометра; T_p — постоянная времени, равная 0,2—1 сек.

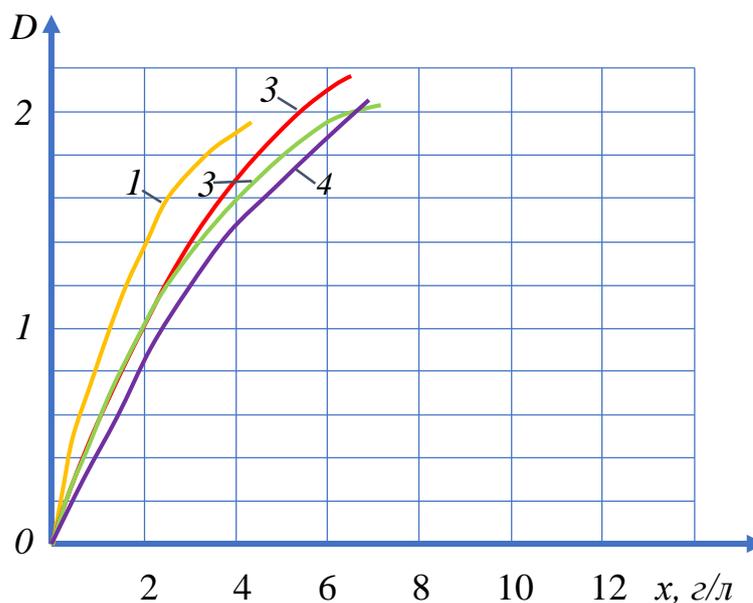


Рис. 5.6. Корреляционная зависимость между концентрацией активного ила x и его оптической плотностью D для илов различных очистных станций, где 1. *Лабораторной установки (Саларской станции аэрации)*; 2. *Бектемирской*; 3. *Кардарья*; 4. *Буз сув*.

5.5. Многофункциональное микропроцессорное устройство контроля уровня воды в аэротенках очистных сооружений

В настоящее время получение достоверной информации об уровне в аэротенках очистных сооружениях является актуальной проблемой.

Принцип работы прибора основан на преобразовании распределенного светового потока в полом световоде [128, 131].

Конструктивно устройство состоит (рис. 5.7) из протяженного полого световода 1; из тонкослойной фторопластовой трубки с внутренним диаметром $s_1=45$ мм, наружный диаметр $D=55$ мм, длиной $L=3$ м, на верхнем торце которого внутри съемной головки из оргстекла, установлен кольцевой фотоприемник (фоторезистор ФСК-6) 2, и инфракрасный источник излучения (типа АЛ107А-3). С наружной

стороны полого световода установлен подвижный поплавков 4, в полости которого симметрично установлен постоянный магнит 5, взаимодействующий с металлической шайбой 6, установленной в полости световода. На шайбе закреплена зеркально отражающая пленка 7.

При изменении уровня воды происходит перемещение поплавка и соответственно перемещается металлическая шайба с отражающей пленкой, что приводит к изменению светового потока, падающего на щелевой приемник [142, 145].

На рис. 5.8 представлена структурная схема ОПС для измерения и контроля уровня воды и ила.

Дальнейшая обработка сводится к тому, чтобы усилить и линеаризовать сигнал от ОПС, преобразовать его в цифровой вид и выдать результат.

После подключения разъема с оптическим датчиком и подачи напряжения питания прибор готов к работе. В случае, если питание находится ниже нормального, прибор отразит этот факт периодическим морганием индикации. В случае, если питание находится ниже предельного, прибор прекратит свою работу и погасит индикатор.

При нажатии ◀ кнопки прибор покажет температуру окружающей среды. Нажатие и удержание кнопки ■ переводит прибор в режим программирования констант, о чем свидетельствует буква «Р» на табло. После отпускания кнопки ■ отображается номер константы. Нажатием кнопок ◀▶ выбирают нужный номер константы и снова нажимают, и удерживают кнопку ■. После того, как прибор покажет значение константы, можно отпустить кнопку ■ и далее нажатием кнопок ◀▶ можно изменить текущее значение на новое, и нажатием кнопки ■ записать его в память микроконтроллера.

Внешнее или внутреннее напряжение питания поступает на стабилизатор напряжения 1 (5 В). Стабилизатор напряжения обеспечивает стабильным питанием все необходимые узлы прибора.

Стабилизатор тока 5 обеспечивает прохождение постоянного тока через терморезистор, который является датчиком температуры окружающей среды.

Преобразователь питающих напряжений 6 предназначен для преобразования стабилизированного напряжения 5 В в напряжение ± 15 В. Это напряжение необходимо для питания дифференциального усилителя 7, к входу которого подключается оптодатчик 8.

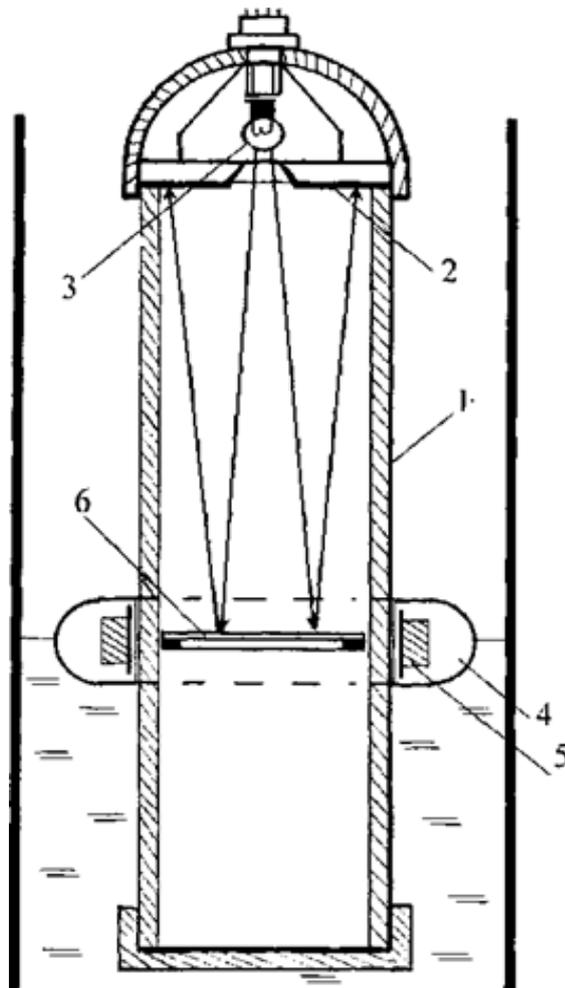


Рис. 5.7. Конструктивная схема ОПС для измерения уровня воды в аванкамерах насосных станций.

Микроконтроллер 2 координирует работу всех узлов прибора, производит опрос всех сигналов, корректирует характеристики, преобразует в цифровой код и выдает информацию в регистр-дешифратор 3.

Регистр-дешифратор 3 предназначен для хранения двоичной информации, преобразования в семисегментный код, а также выдачи информации на жидкокристаллический индикатор.

Жидкокристаллический индикатор предназначен для отображения цифровой информации.

Таким образом, в зависимости от конструкции световода или других факторов, влияющих на характеристику, необходимо корректировать зависимость $\Phi = F(x)$.

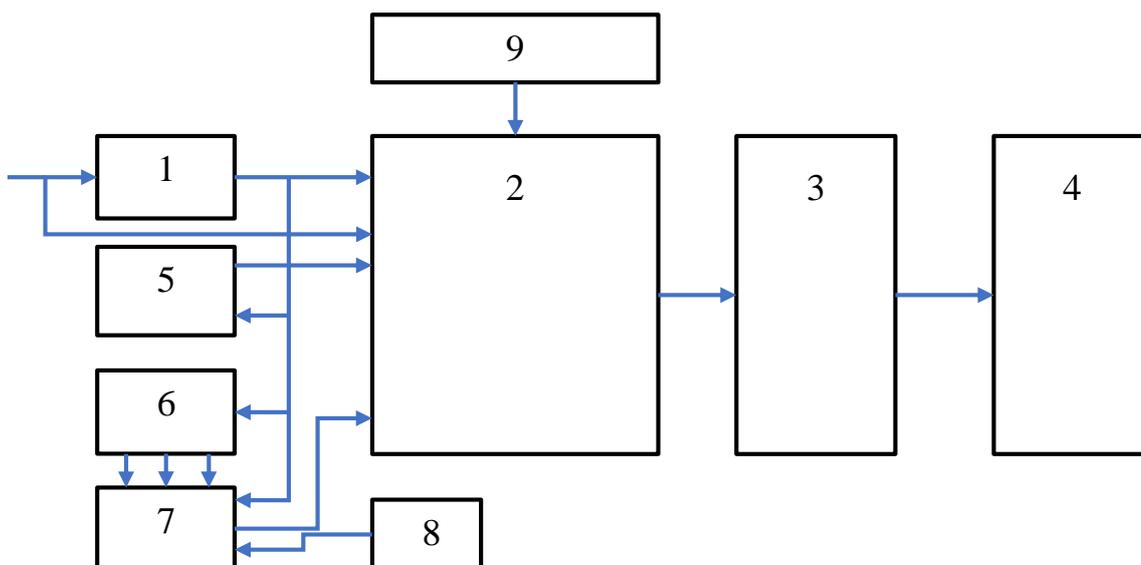


Рис. 5.8. Структурная схема микропроцессорного ОПС измерения и контроля уровня воды в аванкамерах насосных станций, где 1 — стабилизатор напряжения; 2 — микроконтроллер; 3 - регистр дешифратор; 4 - жидкокристаллический дисплей; 5 - стабилизатор тока и термодатчик; 6 - преобразователь питающих напряжений; 7 - дифференциальный усилитель; 8 - оптодатчик; 9 - органы управления.

В приборе предусмотрено изменение трех констант, влияющих на общую характеристику. Формула, участвующая в расчете расстояния между источником и приемником света, имеет следующий вид:

$$L = (A * 10) / \left((K + (B - 50)) + (C - 50) \right), \quad (5.2)$$

где A, B, C - поправочные коэффициенты,

K - код АЦП (максимальное значение $2^{10}=1024$).

При максимальной освещенности код АЦП имеет максимальное значение. При этом напряжение с выхода оптического усилителя не должно превышать 3,9 В.

Поправочный коэффициент A имеет условный номер при программировании - 1, изменяется в пределах $0 \div 999$ с дискретностью 1.

Поправочный коэффициент B имеет условный номер при программировании - 2, изменяется в пределах $0 \div 100$ с дискретностью 0,1.

Поправочный коэффициент C имеет условный номер при программировании - 3, изменяется в пределах $0 \div 100$ с дискретностью 0,1.

В приборе имеется звуковая сигнализация, которая срабатывает при

превышении максимального порога и при меньшем значении минимального порога.

Уставка максимального порога имеет условный номер при программировании - 4, изменяется в пределах $0 \div 300$ (см) с дискретностью 1 см.

Уставка минимального порога имеет условный номер при программировании - 5, изменяется в пределах $0 \div 300$ (см) с дискретностью 1 см.

Внешнее или внутреннее напряжение питания поступает на интегральный стабилизатор напряжения КРЕН5А и также на делитель напряжения R6, R7. Напряжение с делителя поступает на микроконтроллер для контроля питающего напряжения. Выходное напряжение с интегрального стабилизатора напряжения КРЕН5А фильтруется конденсатором С1.

Преобразователь питающих напряжений построен на транзисторах VT2, VT3, импульсном преобразователе ТТ1, выпрямительных диодах VD5- VD8, выходном фильтре С7, С9. Принципиальная электрическая схема МП ОПС измерения и контроля уровня воды в аванкамерах насосных станций приведена в Приложении 6.

Работает МП ОПС следующим образом:

Пара противофазных импульсов частотой около 13 кГц и скважностью 2с микроконтроллера через разделительные конденсаторы С10, С11 поступают на базы транзисторов VT2, VT3 Стабилизированное напряжение, поступающее на средний вывод первичной обмотки трансформатора, обеспечивает протекание тока в ней соответственно коммутирующим транзисторам. Поскольку первичные обмотки трансформатора включены «согласно», то поочередное открывание транзисторов приведет к протеканию переменного тока в первичной обмотке в целом. Напряжение с вторичных обмоток трансформатора поступает на выпрямительный диодный мост VD5 - VD8 и фильтруется выходным фильтром С7, С9.

Источник опорного напряжения для АЦП и для узла измерения температуры собран на полевом транзисторе Q1 и диодах VD1-VD3. Фильтр L1, С4 предотвращает проникновение высокочастотных составляющих от цепи питания контроллера и преобразователя питающих напряжений.

Кнопки S1-S3 служат органами управления прибора.

Узел измерения температуры состоит из двух генераторов тока и термосопротивления. Генератор тока, собранный на полевом транзисторе Q2, R4 служит для задания стабильного тока через терморезистор R1. на элементах VT4, R2, R3 собран второй генератор тока, который в

зависимости от падения напряжения на термоэлементе задает ток через сопротивление R5. Падение напряжения на этом резисторе подается на вход контроллера как функция температуры.

ОПС совместно с усилителем выполнен в виде выносного блока с целью уменьшения внешних наводок. Усилитель питается двуполярным напряжением $\pm 15\text{В}$ от преобразователя. На элементах Q3, VD4, C6 собран стабилизатор напряжения 7В для питания измерительного моста R9, R10, R16, R17, в одно из плеч которого установлен фотоэлемент R9. К выходу измерительного моста подключен дифференциальный операционный усилитель с коэффициентом усиления 6. Выход усилителя подключен к микроконтроллеру для дальнейшей обработки.

Выходная цифровая информация в двоичном виде записывается в регистры-дешифраторы DD13, DD15-DD18. Эти элементы помимо своего основного назначения - хранение и преобразование двоичного кода в семисегментный код, обеспечивают переменным напряжением жидкокристаллический индикатор. Переменное питание для жидкокристаллического индикатора необходимо для того, чтобы в электролите индикатора не было электролиза, который выводит из строя индикатор.

Технические характеристики прибора:

- | | |
|---|----------------------|
| 1. Максимально измеряемая разница между и источником света | приемником
100 см |
| 2. Пределы задания максимального порога | 0÷300 см |
| 3. Пределы задания минимального порога | 0÷100 см |
| 4. Дискретность изменения порогов | 1 см |
| 5. Погрешность измерения | $\pm 0,5$ см |
| 6. Напряжение питания | 9В |
| 7. Встроенный интерфейсный модуль | |
| 8. Связь с ПК по каналу RS232 | |
| 9. Сохранение архивных значений при отключении сетевого питания | |
| 10. Индикация параметров уровня на ЖКИ | |
| 11. Потребляемый ток при $U_{nom} = 9\text{В}$ | 65 мА |
| 12. Масса прибора без источника питания, не более | 200 г |
| 13. Габариты | 3010x55 мм |
| 14. Рабочий диапазон температур | -10 ÷ +60 °С |

В случае, если питание находится ниже нормального, прибор отразит этот факт периодическим морганием индикации. В случае, если питание находится ниже предельного, прибор прекратит свою работу и погасит индикатор.

5.6. Микропроцессорное устройство управления аварийными выбросами в очистных сооружениях

Оценка аварийной ситуации промышленного объекта предусматривает определение степени защищенности объекта и территории вокруг него от воздействия вредных факторов производственного процесса, в том числе при аварийных ситуациях.

Безопасность объекта должна рассматриваться как с точки зрения социальных последствий, так и проблем технической и технологической безопасности. Поэтому моделирование оценок безопасности промышленного объекта требует не только количественных, но и качественных методов. Понятие безопасности объекта необходимо рассматривать с двух позиций [9, 13, 17]:

1. Безопасность в режиме безаварийной работы;
2. Безопасность при возникновении аварийной ситуации.

Структурная схема микропроцессорного устройства управления аварийными выбросами в очистных сооружениях приведена на рис.5.9.

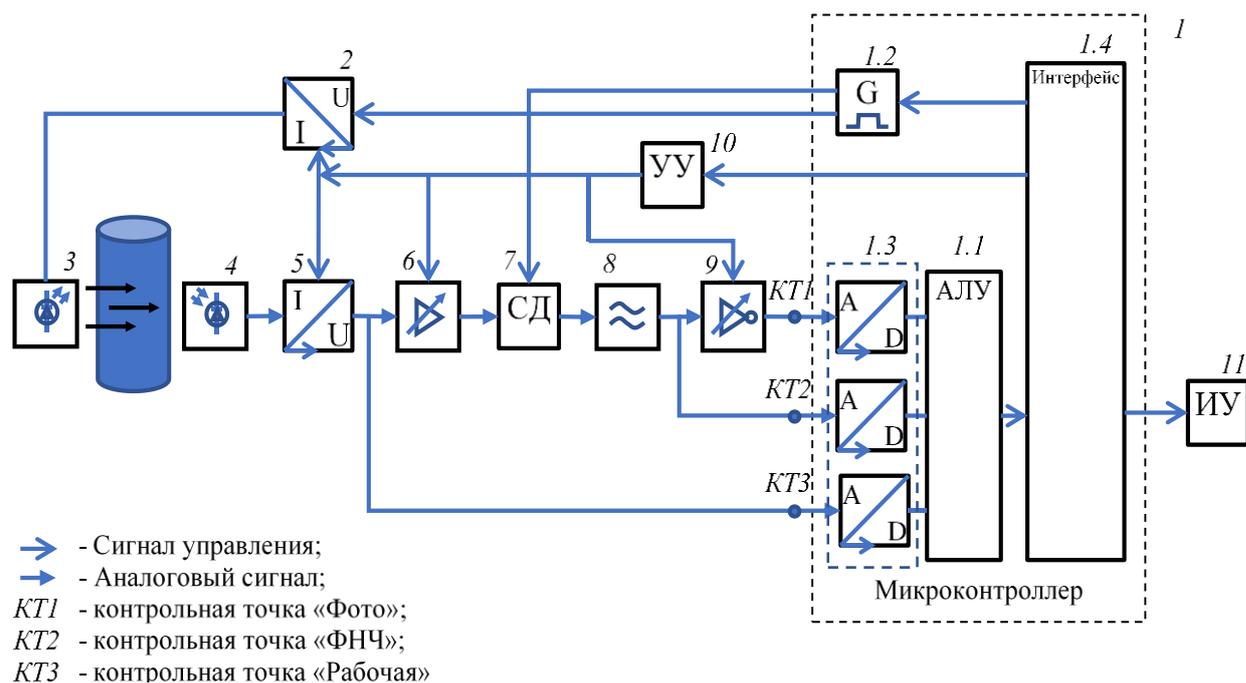


Рис. 5.9. Структурная схема микропроцессорного устройства управления аварийными выбросами в очистных сооружениях.

Прибор включает в себя:

1. Микроконтроллер (АТМЕГА 48);
2. генератор тока, управляемый напряжением;

3. излучатель лазерный;
4. фотоприемник;
5. преобразователь ток-напряжение;
6. усилитель-делитель переменного напряжения;
7. синхронный детектор;
8. фильтр низкой частоты;
9. инвертирующий усилитель с компенсацией входного напряжения;
10. устройство управления и регулировки;
11. исполнительное устройство.

Микроконтроллер ATMEGA 48 включает в себя:

- 1.1 АЛУ - арифметико-логическое устройство;
- 1.2 устройство формирования тактовых сигналов;
- 1.3 10-ти разрядный аналогово - цифровой преобразователь;
- 1.4 Интерфейс управления и обмена данными с внешними устройствами.

При включении прибора микроконтроллер по заданной программе настраивает порты (1.4) и активизирует формирователь тактовых сигналов (1.2). Формирователь тактовых сигналов имеет 2 выхода. Частота этих сигналов одинакова и равна 4000 Гц. Один выход служит для модуляции тока излучения, другой - для коммутации синхронного детектора (7). Также имеется возможность при одинаковой частоте на выходах программно менять фазу сигнала. Микроконтроллер настраивает устройство управления (10). УУ представляет собой микросхему DS1844. DS1844 – это четыре 64 ступенчатых потенциометра с возможностью цифрового управления. С одного регулятора поступает напряжение на генератор тока управляемый напряжением (2), задавая тем самым выходной ток излучателя, туда же поступает тактовый сигнал, который модулирует выходной ток излучателя (3). В результате на излучателе мы имеем импульсы с частотой 4000 Гц и стабильным током. Модулирующее излучение, пройдя водную среду, поступает на фотоприемник (4). Ток от фотоприемника поступает на преобразователь ток - напряжение (5), коэффициент преобразования которого изменяется вторым цифровым регулятором УУ (10). С выхода преобразователя (5) напряжение поступает на АЦП (1.3). Оцифрованный сигнал служит для управления коэффициентом преобразования через УУ (10). Процесс регулировки продолжается до тех пор, пока сигнал не установится в номинальное значение. Далее сигнал поступает на вход усилителя-делителя (6), где отсекается постоянная составляющая сигнала, а переменная усиливается. Коэффициент усиления регулируется третьим регулятором УУ (10). С выхода (6) переменный сигнал поступает на вход синхронного детектора (7). Если усиленные

модулирующие импульсы совпадают по фазе с коммутирующими импульсами СД (7), то на выходе получаются импульсы положительной полярности. Далее, поступая на ФНЧ (8), импульсы сглаживаются, и на выходе ФНЧ будет положительный полезный сигнал. С выхода ФНЧ (КТ2) сигнал поступает на АЦП. Оцифрованный сигнал служит для управления коэффициентом усиления (6) через УУ (10). Процесс регулировки продолжается до тех пор, пока сигнал не установится в номинальные значения. Затем сигнал поступает на инвертирующий усилитель с компенсацией входного напряжения (9). Этот каскад служит для повышения чувствительности прибора. Коэффициент усиления данного каскада равен 2. На этот каскад подается напряжение смещения от четвертого регулятора УУ (10). С выхода (9) сигнал поступает на АЦП (КТ3). Это основной рабочий сигнал, в оцифрованном виде он передается в персональный компьютер, на изменении его осуществляется мониторинг и автоматическая регулировка рабочей точки [139].

Принцип действия АРУ.

Частота дискретизации АЦП равна 100 Герц. Следовательно, время между выборками сигнала равно 10 ms. К этому времени привязаны все действия. При включении устройство настраивается на «текущую среду».

1. Настройка тока излучения и преобразователя ток - напряжение (от минимальной величины к максимальной).

2. Настройка усилителя - делителя (от максимального к минимальному).

3. Настройка напряжения смещения к параметру «Точка смещения (АРУ)» (от максимального к минимальному значению регулятора).

4. За 100 выборок сигнала (1 сек.) вычисляется минимальный и максимальный уровень. Из минимального уровня вычитается параметр «Контроль сигнала (-)», к максимальному добавляется «Контроль сигнала (+)». Данные сохраняются как контрольные параметры. Если данные неприемлемы, то повторяются пункты 1, 2 и 3.

5. Переход в режим контроля. Данный режим привязан к параметру «Аварийная задержка», которая указывает - сколько аварийных выборок сигнала должно пройти, чтобы наступил аварийный момент, то есть, включается счетчик. Если сигнал в пределах контроля, то счетчик обнуляется, если счетчик превысит этот параметр, то включается аварийный режим. Это позволяет избавиться от импульсных и высокочастотных помех. Так, например, при значении 100 устройство будет реагировать на сигнал частотой менее 1 Гц и отсеивать более высокочастотные помехи.

б. Переходим к параметру «Время реакции АРУ» - показывает через какое количество выборок (время) следует произвести автоматическую регулировку устройства. Стоит заметить, что регулировка не производится, а выполняется пункт 4.

Индикатор работы - трехцветный, показывает режим работы.

Зеленый — нормальная автономная работа - осуществляется мониторинг сигнала.

Оранжевый - ручной режим - управление с персонального компьютера. Аварийный контроль отключен.

Красный - режим внутренней обработки - момент автоподстройки, внутренние ошибки.

Индикатор аварии - красный светодиод - указывает на то, что произошла авария.

Кнопка «Вкл.» - кнопка включения прибора.

Кнопка «Сброс» - аппаратная перезагрузка контроллера.

Интерфейсный кабель USB-COM можно использовать любой кабель от сотового телефона, собранный на чипе OTI 6858. Следует только обеспечить питание прибора.

К прибору можно подключать различные фотодатчики, для ограничения возможно фотодиод шунтировать. В прибор встроен измерительный резистор R20 по схеме, номиналом 20 Ом, что обеспечивает выходной ток не более 80мА. Причем выводы этого резистора выведены наружу, контакты RS+ и RS-. RS- присоединяется к общему проводу. Если нужно увеличить ток, то к выводам можно присоединить резистор. Если нужно уменьшить ток, то к выводу RS- последовательно подключить добавочный резистор на общий провод, тем самым уменьшением тока обеспечивается более плавная регулировка тока излучателя [10, 26].

5.7. Автоматическое устройство защиты и отключения электродвигателей в очистных сооружениях

Выход из строя электродвигателя в технологической цепи в сооружениях очистки сточных вод может нарушить непрерывность всего производственного цикла. На замену и ремонт электродвигателя затрачиваются дополнительный труд и обмоточные материалы. Работа двигателя без нагрузки вызывает непроизводительные затраты электроэнергии.

Надежность и эффективность работы электродвигателя во многом зависят от условий его эксплуатации и от правильного выбора устройства защиты, особенно на предприятиях водоподготовки и очистки сточных вод. В системе ГУП «Сувокава», где эксплуатируется 1,5 тыс. электродвигателей, среднегодовой расход электроэнергии на производственно-технологические нужды составляет 14,5 млн. кВт·ч. Анализ показывает, что в течение одной смены 5 более 100 двигателей свыше 5 мин работают на холостом ходу. От превышения нагрузок и перегрева обмоток в течение года ремонта требуют более 600 двигателей.

С целью снижения издержек производства и экономии ресурсов нами разработан и испытан опытный образец автоматического устройства защиты обмоток электродвигателя от перегрузки и отключения двигателя, работающего без нагрузки. Принцип действия такого устройства заключается в одновременном контроле нагрузки на трех фазах и фазового сдвига между напряжениями на них. В устройстве использованы два одинаковых трансформатора тока Т1 и Т2 (Рис. 5.10).

Число витков первичных обмоток I и II и их включение подбирают так, чтобы с выводов обмоток III трансформаторов можно было снять два напряжения U_1 и U_2 , сдвинутых по фазе на угол 90° . При нормальной работе электродвигателя напряжения U_1 и U_2 равны, реле К1 обесточено.

При обрыве одного из фазных проводов угол фазного сдвига между токами трехфазной сети, а также угол сдвига между напряжениями U_1 и U_2 изменяются. Нарушается и равенство амплитуд и соответственно на правой обмотке реле К1 появляется напряжение. Замкнуты контакты его размыкаются и отключают электродвигатель М1. При перегрузке электродвигателя, не нарушающей фазовой симметрии, увеличиваются лишь значения напряжений U_1 и U_2 . К выводам обмотки III трансформатора Т подключен элемент контроля перегрузки, выполненный по схеме бесконтактного реле времени на диоде V_7 , резисторном делителе напряжения R6, R7, R8, R9, конденсаторе C_1 . Переменным резистором R7 устанавливают порог срабатывания элемента контроля перегрузки, соответствующий максимально допустимой перегрузке электродвигателя.

Относительно большая емкость конденсатора C_1 позволяет устройству «разрешать» кратковременные (и потому неопасные) перегрузки двигателя, не допуская тем самым необоснованного его отключения.

Для отключения оборудования при холостом режиме к схеме подключен таймер холостого хода. При работе двигателя под нагрузкой напряжение на выходе любого из трансформаторов тока, т.е. на обмотке

III (U_2), превышает пороговое напряжение срабатывания таймера. Отсчета времени не происходит. Если двигатель работает без нагрузки, напряжение на обмотке III трансформатора T2 понижается до уровня, достаточного для включения электронной схемы таймера. Происходит разряд емкости конденсатора C5 через время задающую цепь (R17, R18, R16). Положительное напряжение конденсатора через стабилитрон V15 удерживает в закрытом состоянии транзистор V16, который в свою очередь удерживает в закрытом состоянии транзистор V17. Реле K2 срабатывает и своими контактами обесточивает обмотку магнитного пускателя двигателя.

В устройстве должно быть постоянное число ампервитков, поэтому для мощных электродвигателей необходимо уменьшить, а для небольших соответственно увеличить число витков обмоток, так как оно определяет значение фазы между напряжениями U_1 и U_2 . Понизить напряжение U_1 и U_2 можно также уменьшением числа витков обмоток III трансформаторов T1 и T2.

Для двигателей мощностью 15 кВт и более устройство подключают через серийно выпускаемые трансформаторы тока 50А/5А, 75А/5А и др. Наладивание устройство сводится к подбору тока срабатывания и продолжительности хода двигателей в соответствии с технологическим процессом обработки изделий на этом оборудовании.

Расчеты экономических показателей от применения устройств проведены по 123 электродвигателям с установкой реле отключения при холостых нагрузках на 5 мин. Общая годовая экономия складывается из экономии: электроэнергии при отключении электродвигателя на холостом ходу; трудозатрат на ремонт электродвигателей, вышедших из строя вследствие перегрузок.

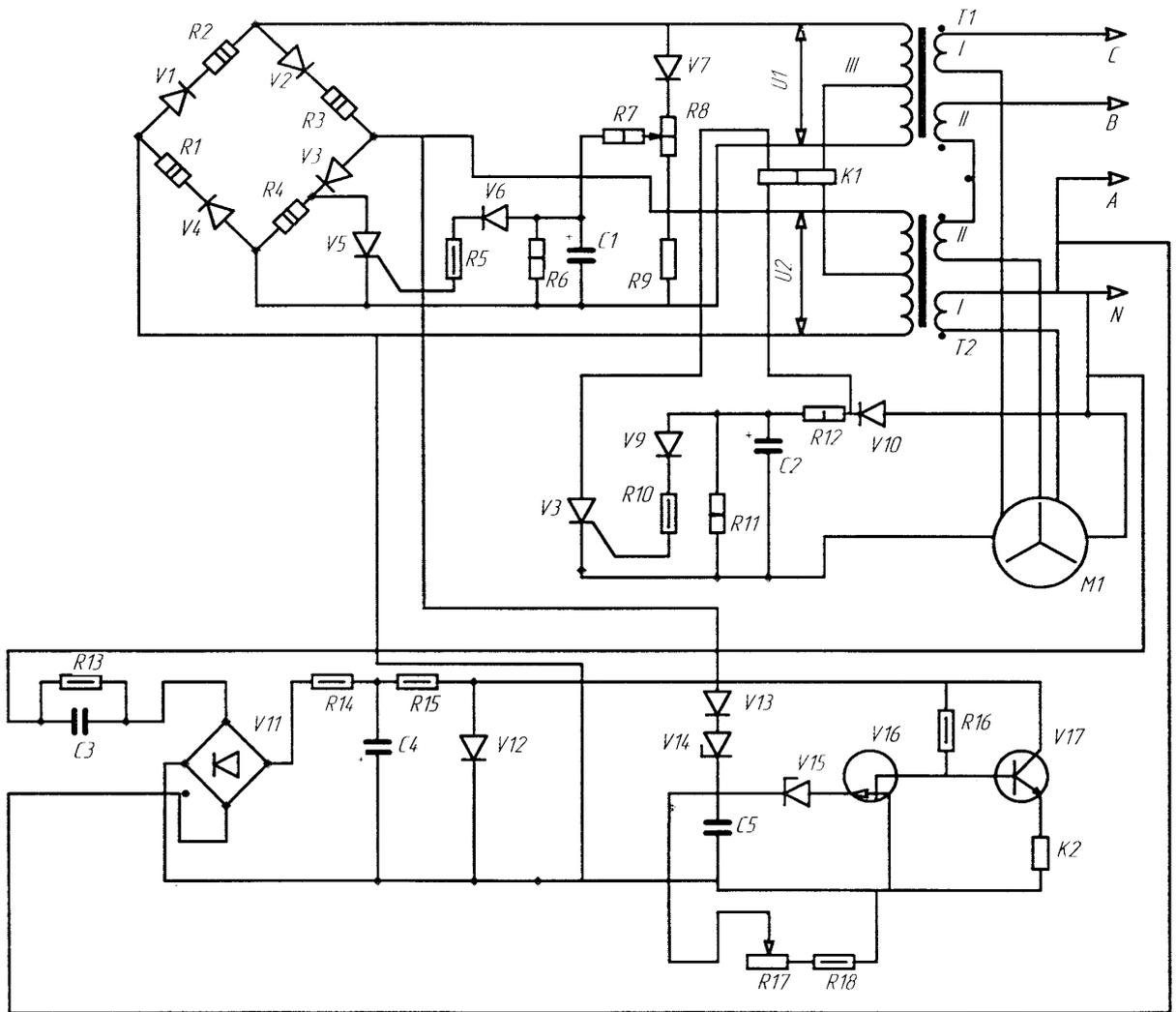


Рис. 5.10 Электрическая схема автоматического устройства защиты и отключения электродвигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Президента Республики Узбекистан от 22 апреля 2017 года № 80 (6744) «О программе комплексного развития и модернизации систем питьевого водоснабжения и канализации на 2017 - 2021 годы» // Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г., № 18, ст. 314.
2. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 23 августа 2016 г. № 273 «Об утверждении программы мониторинга окружающей природной среды в Республике Узбекистан на 2016-2020 годы» // Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2016 г., № 34, ст. 404, № 52, ст. 602.
3. Закон Республики Узбекистан «О воде и водопользовании» // Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2016 г., № 52, ст. 597.
4. Закон Республики Узбекистан «Об охране природы» // Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г., № 24, ст. 487.
5. Chen F.C., Khalil H. K. Adaptive control of nonlinear systems using neural networks., Int. J. Control, 1992., 55, (6), pp. 1299-1317.
6. Computational intelligence: theory and application 6th Fuzzy Days, Dortmund; sprihger, 1999.-142 p.
7. Haykin. S. Neyral networks: A Comprehensive Foundation. New York A Macmillan Publishing, 1995.-578 p.
8. Janschek K. Perspektiven der Automatisierungstechnik - Sichten und Einsichten // Automatisierungstechnik. - Sichten und Einsichten// Automatisierungstechnik. - 2011. - Vol. 49, H. 9.- S. 387-390.
9. Liu C.C., Chen F.C. Adaptive control nonlinear continuous-time system using neural networks-general relative degree and MIMO cases. Int. J. Control, 1993. 58.(2), pp. 317-335.
10. Paul J. Werbos, Backpropagation Through Time: What It Does and How to Do It // Artificial Neural Networks: Concepts and Theory, IEEE Computer Society Press. - 1992.- №1, 309-319p.
11. Bakushinskii A.B., Goncharsky A.V. Iterative methods for solving ill-posed problems. -M.: Nauka, 1989. -128 с.
12. Schumny H. Standardised interfases for intelligent measurement // Intelligent Measurement: 5th Intern. IMEKO Symp., June 10-14, 1986. -Vol. L, Nr 1.-Pp. 81-87.
13. Van Biesen L., Bakx P. Expert Systems for Intelligent Measurements // Proceedings of IMEKO TC7, Symp. 'Intelligent Measurement -INQUAMESS 86', Jena (DDR), June 1986. - Pp. 297-300.

14. Yamasa M. H., Shimokawa M., Mitsuhashi W. New Structure for r Intelligent Sensors // IEEE Tech. Digest on TRANSDUCERS '85. - 1985. - №6.-Pp. 38- 41.
15. Yuan M., Poo A.N., Hong G.S. Direct neural control system: Nonlinear extension of adaptive control. // IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol.142, № 6, Nov. 1995., p.661-667.
16. Абрамов Н.Н. Водоснабжение. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1974. - 480 с.
17. Авт. свид. №1427247, МПК G01N21/05. Проточный бесконтактный мутномер для жидких сред. Оpubл. 30.09.1988.
18. Автоматизация водопроводно-канализационных сооружений: Реферативный журнал/Под ред. Шмидта Л.И. М.: Знание 1973. -437с.
19. Morozov V.A. Regular methods for solving ill-posed problems, М.: Nauka, 1987.
20. Автоматизированная система диспетчеризации и управления процессом очистки промышленных стоков. Григорий Р. Системная интеграция «Экология» №1, 2012, с. 66-73.
21. Vainikko G.M., Veretennikov A.J. Iterative procedure in ill-posed problems. -М.: Nauka, 1986 - 178 p. Demmel J.W. Applied numerical linear algebra. – Siam, 1997.
22. Demmel J.W. Applied numerical linear algebra. – Siam, 1997.
23. Аксенов В.И., Ладыгичев М.Г., Ничкова И.И., Никулин В.А., Кляйн С.Э., Аксенов Е.В. Водное хозяйство промышленных предприятий: Справочное издание: Книга 1 - М.: Теплотехник, 2005. - 640 с,
24. Алексеев В.А., Ардашев С.А., Козаченко Е.М., Юран С.И. Система управления автоматической установкой контроля оптической плотности сточных вод // Вестник ИжГТУ. - 2010. -№4. -С. 101-105.
25. Алексеев В.А., Козаченко Е.М., Хедр А. Снижение влияния аварийных выбросов в системах фильтрации сточных вод // Интеллектуальные системы в производстве 2008, №2. - Изд. ИжГТУ, 2008. - С. 137-144.
26. Алексеев В.И., Винокуров Т.Е. Пугачев Е.А. Проектирование сооружений переработки и утилизации осадков сточных вод с использованием элементов компьютерных технологий. Учебное пособие. - М.: Издательство АСВ, 2003. -173 с.
27. Азимов Р. К., Шипулин Ю. Г. «Оптоэлектронные преобразователи больших перемещений на основе полых световодов» М.: Энергоатомиздат, 1987, 56 с.
28. Андреев И.А. Экспертная система управления качеством промышленных сточных вод, сбрасываемых в коммунальную канализацию // Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.04 -Тольятти, 2007.

29. Березин В. Очистка сточных вод в различных отраслях промышленности, -М.:Знание, 1989. -538 с.
30. Verlan A.F., Sizikov V.S. Integral equations: methods, algorithms and programs. Naukova Dumka, 1986. - 542 p.
31. Бобицкий Л.А. Очистка промышленных сточных вод и приборы экологического контроля воды и воздуха. М.: Высш. шк., 1987. -347с!
32. Боголюбов Н. В. Автоматизация управления технологическими процессами обработки воды. Киев: Наук. Думка, 1987. - 204с.
33. Вавилин, В. А. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов / В. А. Вавилин, В. Б. Васильев, С. В. Рытов. - Москва: Наука, 1993. - 203 с.
34. Galiullin A.S. Methods for solving inverse problems of dynamics. -М.: Nauka, 1986.
35. Водоотведение: учебник / Ю. В. Воронов [и др.]; под общ. ред. Ю. В. Воронова. - Москва: ИНФРА-М, 2011. - 413, [1] с.
36. Водоотводящие системы промышленных предприятий: Учеб. для вузов / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М.Ласков, Ю.В. Воронов; Под ред. С. Яковлева. М.: Стройиздат, 1990. 511с.: ил.
37. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод: учеб. для вузов. 4-е изд., доп. и перераб. М.: АСВ: Изд-во МГСУ, 2006. – 704 с.
38. Гавриленков, А. М. Оборудование для очистки воздушных выбросов и сточных вод пищевых предприятий: учебное пособие / А. М. Гавриленков, Е. А. Рудыка. - Санкт-Петербург: ГИОРД, 2007. - 113, [2] с.
39. Герзон В.М., Мамет А.П., Юрчевский Е.Б. Управление водоподготовительным оборудованием и установками. М.: Энергоатомиздат, 1985. - 232с., ил.
40. Государственный контроль качества воды. М.: ИПК, издательство стандартов, 2013, 776 с.
41. Гордин И. В., Манусова Н. Б., Смирнов Д. Н. «Оптимизация химико-технологических систем очистки промышленных сточных вод» Л.: Химия, 1977, 176 с.
42. Давыдов Ю. Ф. Экспериментальное изучение работы выпусков сточных вод / Ю. Ф. Давыдов, А. Н. Ким // Вода и экология: проблемы и решения. - 2012. - № 4. – С. 51-57.
43. Демков А. И. Новая концепция очистки канализационных стоков. Канализационные сооружения. №3, 2005, с. 1-9.
44. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П. Обеспечение качества питьевой воды в свете новых нормативных требований // Водоснабжение и санитарная техника. - 2004, №9. - С. 2 - 6.

45. Vengerov A.A., Scharensky V.A. Applied optimal linear filtering. -М.: Energoizdat, 1982. - 192 p.
46. Ебулаев Ю. Волковой В. и др. АСУТП Очистки сточных вод // Промышленные АСУ и контроллеры. -1999. -№2. С. 23-26.
47. Иванов П. А. Автоматизация и управление процессами очистки и транспортировки воды. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1988,- 114с.
48. Иванова Г.В., Ремизова О.А. Нейронная сеть в системе управления процессом очистки сточных вод свинцовых аккумуляторных производств Тез. докл. Межд. конф. Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-14).-2001.-Т.2, С.216.
49. Извлечение ионов тяжелых металлов из биологически очищенных городских сточных вод / В. Н. Швецов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. - 2012. № 7. - С. 59-63.
50. Калицун, В. И. Лабораторный практикум по водоотведению и очистке сточных вод: учебное пособие / В. И. Калицун, Ю. М. Ласков. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Стройиздат, 1995. - 270 с.
51. Карелин Я.А., Попова И.А., Евсеева Л.А. и др. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов - М.: Стройиздат, 1982. - с.
52. Антонов В., Терехов В., Тюкин И. адаптивное управление в технических системах. Учебное пособие. СПб.: Санкт-Петербургский университет. 2001. 244 с.
53. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Юнимедиастайл. 2002, 822 с.
54. Лапшенков Г.И., Полоцкий Л.М. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. Технические средства и лабораторные работы- М.: Химия, 1988. -288с.
55. Лев В., Артукуметов З. «Сточные воды и орошение» Т.: Мехнат, 1990, 107 с.
56. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. - 448 с.
57. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad / Учебный курс. СПб.: Питер, 2005. - 448 с.
58. Найденко В.В., Кулакова А.П., Шеренков И.А. Оптимизация процессов очистки природных и сточных вод. -М.: Стройиздат, 1984. - 152 с.
59. Новейшие озоновые технологии очистки воды (Pozitron - Quinta): [кат. изделий] / ООО «Т. К. Позитрон», ООО «НТЦ Квинта». - Москва: ООО «Т.К. Позитрон», [2008]. - 21 с.
- 60.Афанасьев В.Н., Данилина А.Н. О некоторых подходах к задаче адаптивного субоптимального управления нестационарными объектами // АиТ, №12, 1987. -С. 117-130.

61. Основы автоматизации процессов защиты окружающей среды: учебное пособие / А. И. Козлов [и др.]; Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова. - Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 2003. - 103 с.
62. Боголюбов Н.В. Автоматизация управления технологическими процессами обработки воды. - Киев: Наукова думка, 1987. - 204 с.
63. Очистка природных и сточных вод: сборник научных трудов / ОАО «НИИ ВОДГЕО»; [науч. ред. В. Н. Швецов]. - Юбил. вып. - Москва: ВСТ; Москва: Журн. Водоснабжение и санитарная техника, 2009. - 76 с.
64. Очистка производственных сточных вод: учебное пособие для вузов / Под ред. С.В. Яковлева. - М: Стройиздат, 1985. - с.
65. Очистка сточных вод и регенерация ценных компонентов: Справочник/ Под ред. Проскурякова В.А М.: МХТИ, 1991. -497 с.
66. Очистка сточных вод от взвешенных веществ и неорганических примесей. Т. 1 - Москва: НИЦ «Глобус». - 2007. - 81 с.
67. Очистка сточных вод промышленных предприятий: Реферативный журнал отеч. и ин. лит. за 1989 1990. /Под ред. А.А. Кузьмина. - М.: Мосиздат, 1990.-. 333 с.
68. Очистка сточных вод промышленных предприятий: Реферативный журнал отеч. и ин. лит. за 1988. /Под ред. А.А. Кузьмина. - М.: Мосиздат, 1989. -298с.
69. П.Леддер Г Новая дискретная модель коагуляции// Математическое моделирование. -2001. -№2. С. 23-37.
70. Патент №11895 на полезную модель, РФ. МПК G01N 21/05. Устройство для определения загрязненности воды. Оpubл. 16.11.1999.
71. Попкович Г.С., Кузьмин А.А. Автоматизация систем водоснабжения и канализации. -2-е изд. М.: Стройиздат, 1983. -151с.
72. Портативные рН/мВ метры. Проспект «ЭКО инструмент» - Пасиярт, 2009.
73. Попкович Г.С., Гордеев М.А. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения. -М: Высшая школа, 1986. -392 с.
74. Промышленные приборы и средства автоматизации. Справочник под общей ред. В.В. Черенкова Л.: Машиностроение, 1987. - 847 е., ил.
75. Проскуряков В.А., Шмидт Л.И. Очистка сточных вод в химической промышленности. Л.: Химия, 1977-380 с.
76. Рациональное использование и очистка воды на машиностроительных предприятиях / В. М. Макаров, Ю. П. Беличенко, В. С. Галустов [и др.]. - Москва: Машиностроение, 1988. - 271 с.
77. Резников А. А., Муликовская Е. П. «Методы анализа природных вод» М.: ГНТИ, 1954, 236 с.
78. Роев Г.А. Очистные сооружения. Охрана окружающей среды - М.: Недра, 1993. - с.

79. Руководство по контролю качества питьевой воды. Всемирная организация здравоохранения. Женева 1994 г.; Рекомендации том 1. - 211 с.
80. Евстафьев К.Ю. Системы автоматического управления процессом обезвоживания осадков. - Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2005, №7. -С.44.
81. Смирнов Д. Н. «Автоматическое регулирование процессов очистки сточных и природных вод» М.: Стройиздат, 1984, 256 с.
82. Стахов Е.А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения и транспорта нефтепродуктов - Л.: Недра, 1983. - с.
83. Телегина М.В., Цапок М.В. Система сбора и обработки данных экологического мониторинга //Геоинформатика, 2008, №3. - С. 17-20.
84. Рульнов А.А., Евстафьев К.Ю., Горюнов И.И. Автоматизация инженерных систем зданий и очистных сооружений. - М.: МГСУ, 2004. - 210 с.
85. Технологии и оборудование для комплексной очистки сточных вод с использованием биологических методов. Т. 1. - Москва: НИЦ «Глобус», 2007. - 50 с.
86. Технологии и оборудование для комплексной очистки сточных вод с использованием биологических методов. Т. 2. - Москва: НИЦ «Глобус», 2007. - 82 с.
87. Толмаская И.И., Терлецкий М.Ю., Онищенко А.Г. Современные технологии автоматизации на химическом производстве. // Промышленные АСУ и контроллеры. -2000. -№4. С 24-27.
88. Уваров А.В. Внедрение систем автоматизации на базе комплекса Деконт. // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2000. -№7. С 23-28.
89. Устинова Т.П., Титоренко Е.И., Артеменко С.Е., Кардаш М.М., Журавлева Л.Л., Лавриненко Т.И.// Об эффективности локальных установок очистки производственных сточных вод. 2001.-№2. С 32-36.
90. Учеваткина, Н. В. Очистка и обезвреживание производственных сточных вод: текст лекций. Ч. 2 / Н. В. Учеваткина; Моск. гос. индустр. Ун-т. - Москва: МГИУ, 2008. - 63 с.
91. Фирменный каталог по очистке сточных вод. Т. 1: [поставщики, производители оборудования и материалов, проектировщики очистных систем, разработчики технологий, водоканалы и фирмы по эксплуатации очистных сооружений] / ООО «Науч.-информ. центр «Глобус». - Москва: «НИЦ «Глобус», 2007. - 66 л.
92. Фирменный каталог по очистке сточных вод. Т. 2: [поставщики, производители оборудования и материалов, проектировщики очистных систем, разработчики технологий, водоканалы и фирмы по эксплуатации

- очистных сооружений] / ООО «Науч.-информ. центр «Глобус». - Москва: «НИЦ «Глобус», 2007. - 70 л.
93. Фирменный каталог по очистке сточных вод. Т. 3: [поставщики, производители оборудования и материалов, проектировщики очистных систем, разработчики технологий, водоканалы и фирмы по эксплуатации очистных сооружений] / ООО «Науч.-информ. центр «Глобус». - Москва: «НИЦ «Глобус», 2007. - 77 л.
94. Фролов С.В., Третьяков А.А. Синтез математических моделей для промышленных АСУ на основе нейронных сетей. // Промышленные АСУ и контроллеры. -2000. -№2. С 25-27.
95. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсей И. и др. Очистка сточных вод: Биологические и химические процессы. Пер. с англ. Учебн. пособие. -М.: Мир, 2004. - с.
96. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. -М.: Наука, 1979. - 285 с.
97. Швабе К. «Основы технического измерения рН» М.: ИЛ, 1992.
98. Шевченко Т.В., Краснова Т.А., Коршунова О.Н. Очистка водных суспензий модифицируемыми флокулянтами// Химическая промышленность 2001. - №4 С. 25-37
99. Шубов, Л. Я. Технология отходов: учебник / Л. Я. Шубов, М. Е. Ставровский, А. В. Олейник; под ред. Л. Я. Шубова. - Москва: Альфа-М; Москва: Уником Сервис; Москва: ИНФРА-М, 2011. - 348, [1] с.
100. Щербаков Б.Я., Чиликин А.Я., В Ижевский В.С. Залповые сбросы производственных сточных вод и их последствия // Экология и промышленность России, 2002, №7. -С. 39-40.
101. Экология очистки сточных вод физико-химическими методами / Н. С. Серпокрылов [и др.]. - Москва: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. - 261 с.
102. Эндюськин, П. Н. Промышленная экология: очистка газовых выбросов, сточных вод и твердых отходов: лаб. практикум / П. Н. Эндюськин, П. М. Лукин; П. Н. Эндюськин, П. М. Лукин, Чуваш. гос. ун-т. - Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 1999. - 50 с.
103. Яковлев С.В. Карюхина Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. - М.: Стройиздат, 1980. -200с.
104. Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Земляков С.Д. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. -М.: Наука, 1980.
105. Дмитриев О. А. Бесконтактный датчик мутности жидких сред с многоэлементным кольцевым фотодетектором для систем управления технологическими процессами. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Уфа – 2014.

106. Кинеббас А. К. Совершенствование системы контроля и мониторинга качества воды в условиях современного мегаполиса. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2007.
107. Козаченко Е. М. Разработка автоматизированной системы управления аварийными выбросами в сточных водах промышленных предприятий. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ижевск, 2012.
108. Ljung Lennart. System identification: Theory for the User. PTR Prentice Hall, New Jersey. 1987. -238 p.
109. Москвин А. Л. Автоматизированные системы непрерывного проточного анализа водных сред // Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук: 02.00.02. - Москва: 2003.
110. Ядыкин И.Б. О свойстве адаптируемости регулятора в адаптивных системах управления // Доклады Академии наук, Т.259, №2, 1981. - С.310-314.
111. Конюхов Н. Е., Плют А. А., Шаповалов В. М. Оптоэлектронные измерительные преобразователи. Л.: Энергия, 1977, 128 с.
112. Шекета А. Н. Комплексная система оптимизации технологических процессов аэробной биологической очистки сточных вод. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Щелково, 2008.
113. Борис Решмин. Имитационное моделирование и системы управления. - М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 74 с.
114. Викулина В. Б., Викулин П. Д. Метрологическое обеспечение контроля качества воды. Учебное пособие. - М.: МГСУ, 2011. – 84 с.
115. Владимир Трофимов, Станислав Кулаков. Интеллектуальные автоматизированные системы управления технологическими объектами. - М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 232 с.
116. Ирина Волкова, Татьяна Ершова, Сергей Шипулин. Оценка качества воды водоемов рыбохозяйственного назначения. Учебное пособие. - М.: Юрайт, 2017. – 354 с.
117. Bryson Jr A. E. Yu-Chi-Ho. Applied Optimal Control: Optimization, Estimation, and Control. 1975.
118. Семен Чудновский, Ольга Лихачева. Приборы и средства контроля за природной средой. - М.: Инфра-Инженерия, 2017. – 152 с.
119. Kolos M.V., Kolos I.V. Methods of linear optimal filtration. - М.: Nauka, 2000 - 158 p.
120. Шипулин Ю. Г., Махмудов М. И., Жумаев О. А., Алматаев О. Т. Микропроцессорный оптоэлектронный преобразователь уровня

- жидкости. Научно-технический и производственный журнал «Горный вестник Узбекистана». - Навои, 2010. - 4 №43. - С. 72-73.
121. Махмудов М. И. Формализация задачи построения стохастической имитационной модели процесса регулирования сточных вод // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2011. - №6. - С. 85-87.
122. Махмудов М. И. Выбор алгоритмов идентификации технологических процессов водоочистных сооружений с целью разработки системы управления // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2011. - №2. - С. 85-88.
123. Filtering and stochastic control in dynamic systems. / Ed. KT Leondes Trans. with English, -. М.: Mir, 1980. - 407 p.
124. Севинов Ж. У., Махмудов М. И., Ханкельдыева З. Х. Алгоритмы параметрической идентификации линейных объектов управления // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2015. - №2(62). - С. 73-76.
125. Igamberdiyev H.Z., Shipulin Yu.G., Mahmudov M.I. Sustainable algorithms for dynamic filtering, taking into account the inertia of the measuring device // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 2, February 2017 (India). – pp. 3250-3254.
126. Igamberdiyev H.Z., Shipulin Yu.G., Mahmudov M.I. Regular Correction Algorithms for Dynamic Errors of Measuring // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 3, March 2017 (India). – pp. 3251-3254.
127. Азимов Р. К., Шипулин Ю. Г., Максудов С. А., Махмудов М. И., Рустамов Э., Алматаев О. Т., Холматов У. С., Райимжанова О. С. Устройство для измерения скорости и определения направления горизонтального ветра // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Патент на изобретение № IAP 04754, 20.08.2013.
128. Азимов Р. К., Шипулин Ю. Г., Жумаев О. А., Махмудов М. И., Рустамов Э., Алматаев О. Т., Холматов У. С., Райимжанова О. С. Волоконно-оптический преобразователь уровня жидкости // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Патент на изобретение № IAP 04937, 07.07.2014.
129. Шипулин Ш. Ю., Шипулин Ю. Г., Азимов Р. К., Махмудов М. И. Амплитудные волоконные и полые световодные преобразователи технологических параметров // “Innovation-2010”. Международная научная конференция. Сборник научных статей. - Ташкент, 2010. - С. 222-223.

130. Шипулин Ю. Г., Махмудов М. И., Холматов У. С. Микропроцессорный комплексный искатель трасс энергосиловых кабелей и трубопроводов // "Innovation-2010". Международная научная конференция. Сборник научных статей. - Ташкент, 2010. - С. 246-247.
131. Шипулин Ю. Г. Оптоэлектронные преобразователи на основе полых световодов с внешней модуляцией для систем контроля и управления. Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. Ташкент, 2017.
132. Rustamov E., Makhmudov M. I., Rajimzhanova O. S. Designing Optoelectronic of schemes on the basic and ψ -transformations // Sixth world conference on intelligent systems for industrial automation "WCIS-2010". - Tashkent, 2010. - pp. 183-186.
133. Azimov R. K., Shipulin Yu. G., Makhsudov S. A., Makhmudov M. I., Zhumaev O. A. Intellectual microprocessor testing gas measure instrument installations // Sixth world conference on intelligent systems for industrial automation "WCIS-2010". - Tashkent, 2010. - pp. 266-268.
134. Makhmudov M. I. Industrial sewage neutralization process automatic stabilization systems analysis // Seventh world conference on intelligent systems for industrial, automation "WCIS-2012", Volume II, - Tashkent, 2012. - pp. 260-263.
135. Шипулин Ю. Г., Максудов С. А., Махмудов М. И., Мухаммадалиев Д. Х. Автоматические анализаторы состава веществ на основе волоконно-оптических устройств // Международная научная конференция "Innovation-2012". Сборник научных статей. - Ташкент, 2012. - С. 184-185.
136. Фарманова С. Э., Махмудов М. И., Шипулин Ю. Г. Микропроцессорная многофункциональная система контроля и регистрации показателей химического состава водных сред // «Современные технологии и инновации горно-металлургической отрасли» материалы Республиканской научно-технической конференции. - Навои, 2012. - С. 240-241.
137. Махмудов М. И., Шипулин Ю. Г., Алматаев О. Т. Система контроля и регистрации химического состава воды на Саларской станции аэрации // Республиканская научно-техническая конференция «Новые композиционные материалы на основе органических и неорганических ингредиентов». - Ташкент, 2012. - С. 212-213.
138. Шипулин Ю. Г., Махмудов М. И. Система экстремального регулирования процесса механического обезвоживания осадков и сточных вод // Республиканская научная и научно-техническая конференция "Ишлаб чиқаришдаги машиналар ва механик жихозлар

инновацион технологиялари, ютуқ ва вазифалар”. - Фергана, 2013. - С. 23.

139. Мухаммадалиев Д. Х., Исмаилов Х. А., Холматов У. С., Махмудов М. И., Шипулин Ю. Г. Применение многофункциональных аналоговых регулирующих устройств в АСУ ТП очистки сточных вод // VI международная научно-техническая конференция, «Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития». - Навои, 2013. - С. 500.

140. Махмудов М. И., Шипулин Ю. Г. Вопросы повышения качества управления процессом очистки сточных вод // Международная научная конференция “Innovation-2013”. Сборник научных статей. - Ташкент, 2013. - С. 251-252.

141. Шипулин Ю. Г., Алматаев О. Т., Холматов У. С., Махмудов М. И. Имитационные тренажерные комплексы для систем очистки сточных вод // Международная научно-техническая конференция, «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении» 1-том. - Андижан, 2014. - С. 238-240.

142. Махмудов М. И., Шипулин Ю. Г., Алматаев О. Т. Построение структуры имитационных и тренажерных комплексов систем очистки сточных вод // Материалы научно-технической конференции «Перспективы науки и производства химической технологии в Узбекистане». - Навои, 2014. - С. 278.

143. Шипулин Ю. Г., Махмудов М. И., Абдуллаев Т. М. Оптоэлектронная измерительная система уровня наносов ила // Международная научная конференция “Innovation-2015”. Сборник научных статей. - Ташкент, 2015. - С. 264-265.

144. Sevinov J. U., Zaripov O. O., Makhmudov M. I., Kholkhodjayev B. A. Regular algorithm of adaptive estimation and control of dynamic objects based on predictive models // Conference proceedings. MITA 2015 The 11th international conference on multimedia information technology and application, - Tashkent, 2015. - pp.384-387.

145. Махмудов М. И., Азимов Р. К., Алматаев О. Т. Автоматизация технологических процессов биологической очистки сточных вод с использованием микропроцессорных систем с перестраиваемой структурой // III Международная научно-практическая конференция «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении». - Андижан, 2016. - С. 70-72.

146. Makhmudov M. I. Algorithms for parameter estimation in multi-channel information-measuring systems // Ninth World Conference “Intelligent Systems for Industrial Automation”, WCIS-2016, - Tashkent, Uzbekistan, 2016. - pp. 224-227.

147. Махмудов М. И. Анализ и классификация производственных структур очистных сооружений // “Инновацион ривожланиш муаммолари: ишлаб чиқариш, таълим, илм-фан” мавзусидаги вазирлик миқёсидаги илмий-техникавий анжуман материаллари тўплами. – Андижон, 2017. - 102-105 б.