

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

ЛЕБЕДИК Екатерина Андреевна

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ
ВОДЫ СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (металлургия)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:
доктор технических наук, профессор
Шариков Юрий Васильевич

Санкт-Петербург – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	10
1.1 Классификация технической воды.....	11
1.2 Обратное водоснабжение.....	14
1.3 Оценка эффективности использования промышленного водоснабжения	17
1.4 Охлаждение оборотной воды.....	20
1.4.1 Испарительные охладители	21
1.4.1.1 Теплообмен в испарительных охладителях	21
1.5 Градирни как устройства для охлаждения воды в СОВ	23
1.5.1 Открытые градирни	25
1.5.2 Башенные градирни	26
1.5.3 Вентиляторные градирни	28
1.5.4 Эжекционные охладители.....	30
1.5.5 Радиаторные градирни	31
1.6 Свойства и требования к качеству воды СОВ	32
1.7 Особенности водоснабжения металлургических предприятий	40
1.8 Выводы по главе 1.....	43
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	45
2.1 Выбор и программа методов исследования	45
2.2 Экспериментальные исследования	46
2.2.1 Лабораторная установка и проведение эксперимента	48
2.2.2 Методика определения электропроводности воды	51
2.2.3 Методика определения сухого остатка в воде	53
2.3 Обработка экспериментальных данных	55
2.3.1 Корреляционный анализ.....	58
2.4 Принципы построения моделей	60

2.5	Балансы в системе оборотного водоснабжения.....	66
2.5.1	Потери воды в охладителях	71
2.6	Модель идеального перемешивания.....	72
2.6.1	Математическая модель аппарата идеального перемешивания	77
2.7	Выводы по главе 2.....	80
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ СОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ		81
3.1	Общее описание СОВ охлаждения с градирней.....	81
3.2	Исходные данные для построения математической модели поддержания свойств воды	83
3.3	Описание структуры математической модели.....	87
3.4	Основные требования к качеству воды СОВ.....	87
3.4.1	Индексы стабильности воды.....	89
3.5	Среда моделирования MATLAB	93
3.6	Моделирование в программном пакете MATLAB	94
3.7	Выводы по главе 3.....	105
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ВОДЫ СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА		106
4.1.	Обзор существующих автоматизированных систем дозирования	106
4.2.	Структура АСУ ТП.....	108
4.2.	Постановка задачи стабилизационной обработки воды	111
4.3	Разработка алгоритма и АСУ качеством воды	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		121
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....		130
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....		131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Вода имеет исключительное значение и широкое применение в технологических процессах на большинстве промышленных предприятиях, в том числе металлургических. Промышленные предприятия металлургии подвержены строгому контролю по защите окружающей среды, расходу воды, за количеством и качеством сбрасываемых сточных вод. Большой объем воды на промышленных металлургических предприятиях используется для охлаждения производственных агрегатов. Охлаждающая вода после использования не загрязняется вовсе или загрязняется весьма незначительно, а лишь нагревается, вследствие чего оказывается необходимым или экономически целесообразным такую воду охлаждать и подавать снова для использования на том же объекте. В связи с этим основную роль в водоснабжении предприятий играют системы оборотного водоснабжения.

Поддержание качества воды в оборотных системах испарительного типа является важным фактором оптимального режима работы металлургического производства, главным образом, влияющим на эффективность работы теплообменных устройств. Ухудшение качества воды приводит к уменьшению работоспособности и производительности металлургического производства. Для решения основных возникающих проблем СНИПом предусматривается продувка системы, подщелачивание или подкисление воды и тд. С недавних пор появились новые методы защиты: в систему вводятся различные полимерные добавки - реагенты, предотвращающие образование кальциевых отложений, коррозии и биообрастания в различных элементах оборотной системы предприятия. При охлаждении оборотной воды за счет испарения в градирнях, других потерь и подпитки дешевой, не деминерализованной водой, концентрации солей в системе повышается, меняя свойства оборотной воды, что приводит к необходимости автоматического дозирования и автоматической корректировки дозы полимерных реагентов в зависимости от свойств оборотной воды в различные моменты эксплуатации для поддержания постоянных свойств.

Значительный вклад в разработки в области управления, автоматизации и контроля технологических параметров металлургической промышленности, в области математического моделирования и водоподготовки внесли известные ученые и специалисты Попкович Г.С., Фрог Н.П., Журба М.Г., Репин Б.Н., Ключев А.С., Поляков П.В., Березин А.И., Жужиков В.А., Лазарев С.И., Шариков Ю.В. и другие.

В настоящее время мало информации о применяемых САУ качеством воды для оборотных систем, так как подобные разработки являются интеллектуальной собственностью разработчиков и тщательно скрываются, сохраняя отсутствие серьезной конкуренции на рынке. Из общедоступной информации и личного опыта, известно, что существующие САУ основаны на расчетной информации по датчикам концентраций, имеющим большую погрешность, зависимую от эксплуатационного состояния полупроницаемой мембраны, входящей в конструкцию датчиков. Как результат происходит либо недостаток, либо переизбыток в дозировании реагентов и не достигается стабильное качество воды. Существующий в мире уникальный мониторинг в режиме реального времени, работающий в режиме 24/7, для обнаружения, определения и обеспечения эффективной работы систем охлаждения является очень дорогостоящим запатентованным решением и ограничивает пользователя системы в выборе реагентов, так как данные системы работают только при условии использования реагентов, поставляемых разработчиком. В связи с этим актуально создание САУ, основанной на новых технологических решениях и алгоритмах управления.

Цель работы. Повышение эффективности работы системы оборотного водоснабжения за счет разработки автоматизированной системы управления комплексом оборудования для поддержания оптимальных свойств воды системы оборотного водоснабжения на металлургическом предприятии путем расчета необходимого объема реагентов.

Основные задачи исследования:

1. Научно-технический анализ современного состояния и перспективы развития системы оборотного водоснабжения на металлургических предприятиях, а также оценка степени влияния свойств воды системы оборотного водоснабжения на технологический процесс и работу теплообменного оборудования.

2. Анализ существующих технологических решений дозирования реагентов.

3. Разработка нового технологического решения для поддержания качества воды системы оборотного водоснабжения металлургического предприятия.

4. Создание модели коррекционной обработки воды системы оборотного водоснабжения.

5. Проведение экспериментальных исследований на модели.

6. Разработка алгоритма управления для высокоэффективного дозирования реагентов.

7. Создание автоматизированной системы управления качеством воды системы оборотного водоснабжения с учетом разработанного алгоритма и созданной модели.

Методы исследований. В работе были использованы экспериментальные и теоретические методы исследований. Экспериментальные данные собраны в ходе исследований, проведенных путем физико-химических анализов воды в лабораторных условиях и при моделировании СОВ открытого типа. Также использованы методы анализа практических данных, методы моделирования процессов, методики использования стабилизационных реагентов оборотных систем охлаждения для разработки АСУ комплекса оборудования, поддерживающие оптимальные характеристики качества воды при ее упаривании. Для моделирования системы учета материального и солевого баланса системы оборотного водоснабжения использовался программный продукт MATLAB.

Научная новизна работы:

1. Обосновано, что повышение качества воды системы оборотного водоснабжения обеспечивается введением нового решения, основанного на

поддержании концентрации различных реагентов, путем математического моделирования материального и солевого баланса СОВ.

2. Создана модель коррекционной обработки воды системы оборотного водоснабжения, предусматривающей работу в супервизорном режиме управления и не ограничивающая потребителя в применении конкретных реагентов.

3. Разработана автоматизированная система управления качеством воды на основе предложенного алгоритма, обеспечивающего надежную работу системы оборотного водоснабжения.

Основные защищаемые положения:

1. Модель коррекционной обработки воды системы оборотного водоснабжения, разработанная на основе данных водного баланса системы, позволяет рассчитывать концентрации используемых реагентов и осуществлять прогнозирование объемных расходов для восполнения их потерь и последующую корректировку свойств оборотной воды при разных коэффициентах упаривания.

2. Автоматизированная система управления коррекционной обработки воды, разработанная на основе прогнозирующей модели, обеспечивает постоянную рабочую концентрацию дозируемых реагентов в водообороте, что позволяет существенно сократить количество воды на продувку и увеличить срок службы теплообменного оборудования.

Практическая значимость работы:

1. Получена математическая модель системы оборотного водоснабжения, позволяющая рассчитывать концентрации дозируемых в систему реагентов учитывая гидродинамику потоков. Математическая модель пригодна для использования в системе управления процессом и для включения ее в контур регулирования в качестве предсказывающей модели.

2. Разработанный алгоритм работы для контроля параметров качества воды, основанный на объемно-расчетном принципе поддержания концентраций представляет собой универсальное решение и может быть включен в общий алгоритм работы СОВ, что позволит существенно уменьшить количество

необходимых реагентов, воды на продувку и электроэнергии для циркуляции воды и подачи ее в теплообменники.

3. Предлагаемая АСУ качеством воды СОВ позволит увеличить безремонтный пробег систем рециркуляции воды и решает проблему поддержания оптимального режима работы теплообменного оборудования, при котором предусматривается надежная и долговечная работа.

4. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в учебном процессе факультета переработки минерального сырья Горного университета при изучении курсов «Моделирование объектов и систем управления», «Автоматизация технологических процессов и производств».

Личный вклад автора.

Автор самостоятельно выполнил:

Постановку целей, формулировку задач и разработку общей методики исследований.

Анализ научно-технической литературы и патентный поиск.

Анализ современного состояния системы оборотного водоснабжения металлургического предприятия, влияющих факторов и технологических решений дозирования реагентов.

Выполнение лабораторных исследований.

Разработку математической модели дозирования необходимых реагентов для поддержания постоянных свойств воды.

Разработку технического решения, создание алгоритма и АСУ качеством воды СОВ.

Достоверность научных результатов. Приводимые результаты, выводы и рекомендации подтверждаются значительным объемом экспериментальных данных и их соответствием теории и практики в работе систем оборотного водоснабжения металлургических предприятий, применением современных методов статистического анализа, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Апробация работы.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались и обсуждались на XXVII международной научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий» (Новосибирск, 23 декабря 2015 год), международной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 20-22 апреля 2015 год).

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Содержит 131 страницу машинописного текста, 54 рисунка, 17 таблиц, список литературы из 104 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Промышленные металлургические предприятия расходуют огромные количества воды для технических целей. Вода используется в различных технологических процессах, что приводит к образованию немалого объема загрязненных сточных вод. Стоки предприятий насыщаются различными примесями, порой достаточно вредными. Общая характеристика сточных вод предприятия представлена в таблице 1 [46].

Таблица 1 – Общая характеристика сточных вод предприятия

Вид сточных вод	Категория сточных вод	Источники образования
1	2	3
Производственные	Условно-чистные	1. Системы охлаждения 2. Конденсаты чистые 3. Гидротранспорт
	Малозагрязненные	1. Промывка и ополаскивание продукции 2. Обезвоживание продукции и сырья 3. Конденсаты технологических процессов 4. Очистка твердых и газообразных отходов 5. Мойка оборудования и транспорта 6. Мойка производственных помещений
	Сильнозагрязненные	1. Слив отработанных растворов, маточников и кубовых остатков 2. Установки водоподготовки (элюаты) и очистки стоков (жидкие отходы)
Поверхностные сточные воды	Талые	1. Территория предприятия 2. Крыши административных и производственных зданий, зданий предприятий сферы услуг
	Дождевые	То же
	Поливочные	Мойка территории предприятия
Хозяйственно-бытовые сточные воды	-	1. Санузлы административных и производственных зданий, зданий предприятий сферы услуг 2. Душевые 3. Пищевые блоки 4. Прачечные

Продолжение таблицы 1

Дренажные	-	1. Водопонижение на промплощадках 2. Площадки складирования твердых промышленных отходов 3. Полигоны твердых бытовых отходов
-----------	---	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

В настоящее время много внимания уделяется экологическим проблемам, в частности проблеме охраны водоемов. Metallургические заводы подвергаются строгому контролю по защите окружающей среды, расходу воды, за количеством и качеством сброшенных сточных вод [6]. К сбрасываемым водам применяются серьезные требования. Общие требования к стоковым водам, которые утилизируются предприятиями в городские системы водоотведения, приводятся в таблице 2 [3]. Сточные воды металлургических заводов представляют серьезную опасность окружающей среде. Сокращение сброса сточных вод, снижение использования свежей воды из источников водоснабжения решается на предприятиях созданием оборотных систем водоснабжения [6].

Таблица 2 – Общие требования к сбрасываемым сточным водам

Показатель состава и свойств ОС	ПДК
Взвешенные вещества (ВВ)	500 мг/л
Зольность ВВ	30 %
БПК	500 мг/л
ХПК	800 мг/л
рН	6,5-8,5
Температура	40° С
Порог цветности	1/16
Сухой остаток	2000 мг/л
Хлориды	350 мг/л
Сульфаты	500 мг/л
Эмульгированные вещества	20 мг/л

1.1 Классификация технической воды

В промышленности на металлургических заводах выделяют три основные категории потребителей:

- хозяйственно-питьевые;
- производственные;

– противопожарные.

Производственное (техническое) использование водных ресурсов занимает лидирующую позицию по объему используемой воды и степени ее использования в производстве. Применение воды в обеспечении производственно-технических процессов является ее важной задачей. Воду используют и для охлаждения, и для промывки; а также газоочистки, получения необходимых растворов и др [6].

Для удобства все разнообразие воды для технологических нужд с учетом общих признаков и подходов к разработке систем водоснабжения целесообразно разделить на шесть категорий. Наглядно систематизировано и представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Категории технической воды по общим признакам [6]

Категория воды	Функции
1 категория	Первая категория воды в ходе использования нагревается и загрязняется незначительно. Используют в качестве теплоносителя для охлаждения оборудования и продукта в теплообменниках. Например, охлаждение конденсаторов турбин в теплоэнергетике, металлургических печей в металлургии, компрессоров, холодильных машин и др.
2 категория	Вода второй категории выполняет поглощение и перенос примесей в технологических процессах без тепловыделения. В результате вода загрязняется примесями, но не нагревается. Примером служит промывка продукта и продукции, например, в текстильной промышленности, гальваническом производстве, электронике и др.
3 категория	Вода этой категории в процессе потребления насыщается примесями и нагревается. Она объединяет в себе функции первых двух категорий: одновременно участвует в поглощении примесей и охлаждении

Продолжение таблицы 3

3 категория	продукта или оборудования. К этой категории использования воды относится мокрая газоочистка, охлаждение прокатных станов и машин разливки стали и чугуна в металлургии и др.
4 категория	Вода необходимая для растворения реагентов в химической технологии, красителей в текстильной промышленности, электролитов и др. При этом образуются технологические растворы, которые в сток сливаться не должны.
5 категория	Вода, входящая в состав готовой продукции. Вода этой категории непосредственно в сток не поступает.
6 категория	Вода, применяемая в качестве теплоносителя в теплоэнергетике и теплоснабжении в виде пара и перегретой воды. Такая вода после нагрева в тепло генераторах поступает в теплотехнический контур и в сток не сбрасывается.

Первые три категории применения воды наиболее часто используются, получив широкое распространение. Именно для них рационально создание систем оборотного и замкнутого водоснабжения [6].

В производственных процессах металлургических производств, используемая техническая вода, очень часто употребляется для вспомогательных целей. Классификация технической воды по целевому назначению приведена на рисунке 1 [10]. Из схемы рисунка 1 можно видеть, что техническая вода делится на энергетическую, охлаждающую и технологическую.

1. Энергетическую воду применяют для получения пара и нагревания оборудования, помещений, продуктов.

2. Охлаждающая вода употребляется для охлаждения теплообменных аппаратов, жидких и газообразных продуктов в них и др.

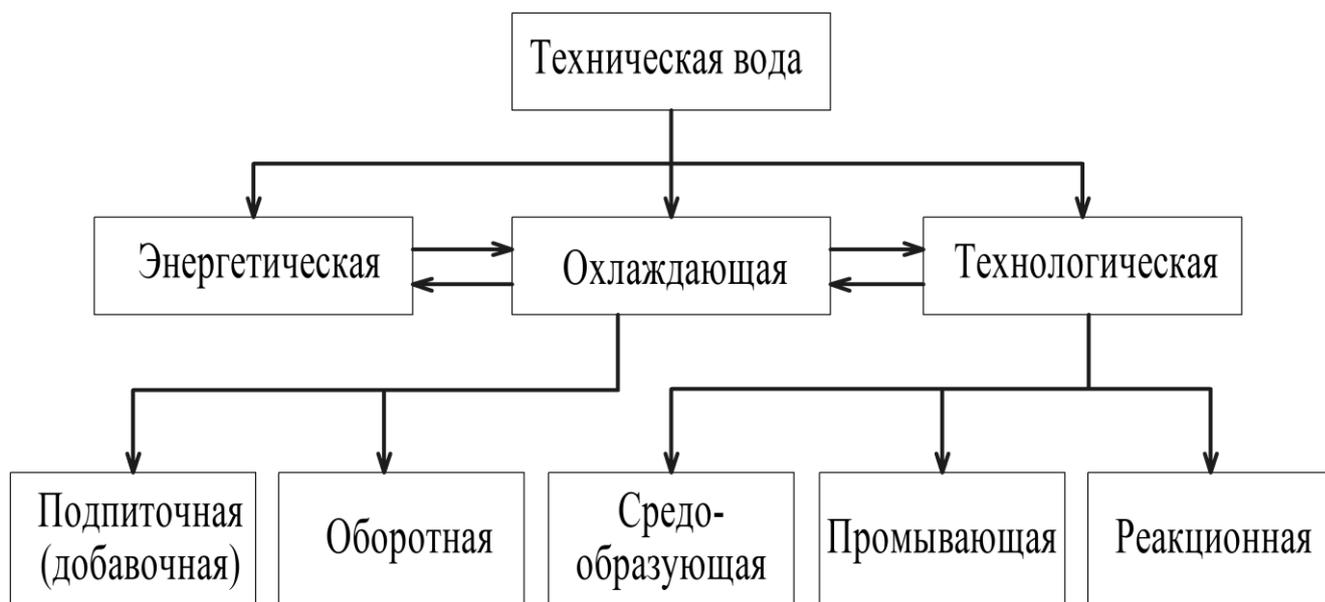


Рисунок 1 – Классификация технической воды по целевому назначению

3. Технологическую воду используют для растворения и образования пульп при обогащении и переработке руд, гидротранспорте продуктов и отходов производства (средообразующая); для промывки газообразных, жидких и твердых продуктов и изделий (промывающая); в качестве реагента, а также при азеотропной отгонке и похожих процессах (реакционная). Технологическая вода непосредственно контактирует с продуктами и изделиями [10].

1.2 Обратное водоснабжение

Используемый объем охлаждающей технической воды равен порядка 65-85% общего расхода воды в промышленности. Такие огромные объемы обязывают к тщательному вниманию ее рационального использования и экономии. Целесообразно такие объемы воды использовать снова. Охлаждающая вода подразделяется, в свою очередь, на подпиточную (добавочную или «свежую») воду (ПВ) и оборотную воду (ОВ). В связи с этим основную роль в водоснабжении металлургических предприятий играют системы оборотного водоснабжения (СОВ) [2].

Подпиточная вода – вода, добавляемая в систему оборотного водоснабжения для восполнения потерь, связанных с продувкой, утечкой, уносом

и испарением воды, а также с переходом ее в продукцию и отходы [7].

Оборотная вода – вода, использованная в технологическом процессе или для охлаждения продуктов и оборудования и после очистки и охлаждения в градирнях или других сооружениях снова подаваемая для тех же целей [47].

Система оборотного водоснабжения (СОВ) – система водного хозяйства предприятий, промышленных узлов производственных комплексов, обеспечивающая возврат всех жидких отходов после соответствующей обработки для повторного использования или переработки на вторичное сырье.

На сегодняшний день водооборот предприятий черной и цветной металлургии по отрасли около 80 %, в частных случаях отдельных заводов этот показатель доходит до 97% (Новолипецкий металлургический комбинат) [6].

Применение систем оборотного водоснабжения оправдано на большинстве промышленных металлургических предприятиях. Огромные количества воды, используемой для охлаждения, не загрязняются или загрязняются весьма незначительно, а лишь нагреваются. Если после использования нагретую воду охлаждать, то она может использоваться снова на том же объекте. При этом подпиточную воду использовать только для восполнения потерь при обороте [2]. Нередки случаи недостаточной мощности источника водоснабжения, где использование СОВ является единственным возможным вариантом. Таким образом, использование оборотного водоснабжения становится экономически выгодно и обладает большими возможностями в удешевлении системы технического водоснабжения. Для повышения эффективности работы систем водоснабжения промышленного предприятия и защиты окружающей среды необходимо стремиться к снижению расходов свежей воды и уменьшению объемов сбрасываемых в водоем сточных вод [12].

По характеру использования воды системы водоснабжения подразделяются на: прямоточные; прямоточные с повторным использованием воды; оборотные; комбинированные; замкнутые [6].

Пример реализации схемы системы оборотного водоснабжения приведен на рисунке 2.

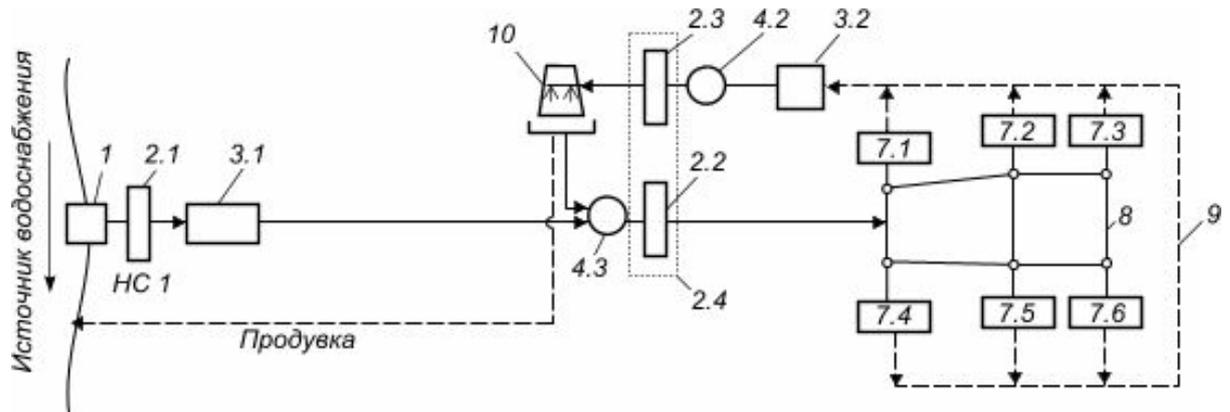


Рисунок 2 – Схема оборотного водоснабжения: 1 – водозабор; 2.1 – насосная станция 1-го подъема; 2.2 – насосная станция 2-го подъема; 2.3 – насосная станция оборотной воды; 2.4 – циркуляционная станция; 3.1 – очистные устройства природной воды; 3.2 – очистные устройства загрязненных стоков; 4.2 – резервуар очищенной теплой воды; 4.3 – сборный резервуар очищенной и охлажденной воды; 7 – потребители воды; 8 - водопроводная сеть; 9 – сеть для сбора отработанной воды; 10 – водоохлаждающее устройство

Вариаций различных схем систем оборотного водоснабжения может быть несколько. Схема водооборота подбирается исходя из условий конкретного предприятия в зависимости от изменения параметров воды в процессе ее потребления. На рисунке 2 отработанная нагретая вода от потребителей воды 7 подается на очистные устройства загрязненных стоков 3.2, далее попадает в резервуар очищенной теплой воды 4.2 и насосной станцией оборотной воды 2.3 подается на водоохлаждающее устройство 10, где происходит ее охлаждение и обеспечивается баланс по количеству тепла в системе. Охлажденная вода в системе собирается в сборный резервуар очищенной и охлажденной воды 4.3 и насосной станцией 2-го подъема 2.2 снова подается через водопроводную сеть потребителям. В конкретных случаях отработанная нагретая вода после водопотребления остаточным напором подается сразу на охладитель, что упрощает схему и уменьшает количество резервуаров и насосных станций [10]. В других случаях не требуются очистные устройства.

Чаще всего на промышленных предприятиях имеется несколько водопотребителей различных категорий водопотребления. Для водоснабжения таких предприятий разрабатываются системы, удовлетворяющие условиям конкретного завода, объединяя несколько различных систем водоснабжения для обеспечения их свежей водой требуемого качества [6].

При работе системы оборотного водоснабжения часть воды теряется с уносом – $Q_{ун}$, испарением – $Q_{исп}$, утечкой – $Q_{ут}$, продувкой – $Q_{пр}$ и при выводе некоторой больше не используемой доли воды – $Q_{сбр}$. Чтобы соблюдался баланс в систему вводится необходимое количество чистой воды – $Q_{ист}$. Количество свежей воды обычно составляет примерно 5-7% от общего количества потребляемой воды на производстве. Оно оценивается с помощью материального баланса системы [2]:

$$Q_{ист} = Q_{ун} + Q_{исп} + Q_{ут} + Q_{пр} + Q_{сбр} \quad (1)$$

Использование СОВ позволяет минимизировать выбросы стоковой воды в водоемы, сократить расходы на строительство водозаборных сооружений и станций 1-ого подъема, а также очистных сооружений природной воды. Такие преимущества являются существенными аргументами при выборе системы водоснабжения.

1.3 Оценка эффективности использования промышленного водоснабжения

Промышленные предприятия предъявляют к оборотной воде различные требования. Они меняются в зависимости от вида производства, производственных процессов. Определяемые экономичностью и надежностью работы оборудования задаются разные требования к качеству охлаждающей воды, ее температуре. В таблице 4 представлены данные об использовании оборотной воды в промышленности [12].

Из таблицы 4 видны масштабы водопотребления на охлаждение. На большинстве предприятий от 50 до 98 % общего количества воды идет на нужды охлаждения, и оно значительно превосходит все остальные виды потребления воды. По некоторым сведениям на охлаждение только для металлургических

заводов расходуется воды столько же, сколько ее потребляется половинной всех коммунальных водопроводов [12].

Таблица 4 – Данные об использовании оборотной воды в промышленности

Отрасль	Расход воды на охлаждение, %	Водооборот, %	Расход оборотной воды на крупных предприятиях, тыс.м ³ /ч	Температура воды, °С		Вид загрязнений
				нагретой в технологическом оборудовании	Охлажденной на градирне	
Теплоэнергетическая	96	60	1000	37-45 ^{*1} 35-38 ^{*2} 35-40 ^{*3}	30-33 30-33 25-30	Условно чистая То же Нефтепродукты
Нефтеперерабатывающая	95	94	100	40-45	25-28	Механические примеси, нефтепродукты
Химическая и нефтехимическая	74-95	64-96	100	40-45	25-30	Органические, минеральные примеси
Черная металлургия	75	93	300 ^{*4}	40-45 ^{*5}	30-35	Механические примеси, нефтепродукты
Цветная металлургия	20	91	5	35-40 ^{*6} 35-40	25-28 25-30	То же „
Целлюлозно-бумажная	7	65	1	32-35 ^{*7}	25-27	Условно чистая
Предприятия легкой промышленности	-	-	6	35-36	27-28	„

^{*1} Конденсаторы паровых турбин. ^{*2} Воздухоохладители обмоток генераторов. ^{*3} Маслоохладители. ^{*4} На комбинатах и заводах с полным металлургическим циклом. ^{*5} Холодильники доменных печей и др. ^{*6} Воздухоохладители и маслоохладители. ^{*7} Конденсаторное оборудование.

Оценить продуктивность употребления воды на предприятии и техническое совершенствование производственного водоснабжения можно используя следующие показатели [47]:

1. Техническое совершенство системы водоснабжения можно оценить количеством использованной оборотной воды в процентах:

$$P_{об} = \frac{W_{об}}{W_{об} + W_{ист} + W_c} 100 \quad (2)$$

$$P_{об} \longrightarrow 100\%,$$

где $W_{обор}$, $W_{ист}$, W_c - расход оборотной воды, забираемой из источника водоснабжения свежей воды, воды, поступающей с сырьем и реагентами.

Среднее значение $P_{об} \sim 60\%$ (для отдельных предприятий черной металлургии, химической промышленности от 75 до 95%).

2. Рациональность использования воды, забираемой из источника, оценивается по коэффициенту использования:

$$K_u = \frac{W_{ист} - W_{сбр}}{W_{ист}} \leq 1 \quad (3)$$

$$K_u \longrightarrow 1,$$

где $W_{сбр}$ - расход воды, сбрасываемый в водоем или городскую канализационную сеть.

Среднее значение $K_u \sim 0,27$, но есть предприятия, имеющие $K_u = 0,75 - 0,85$.

3. Процент безвозвратного потребления и потерь воды в системе водоснабжения от общего ее расхода:

$$P_{пот} = \frac{W_{ист} - W_{сбр}}{W_{ист} + W_{посл} + W_{об}} 100 \quad (4)$$

$$P_{пот} \longrightarrow 0,$$

где $W_{посл}$ - расход последовательно используемой воды. Среднее значение $P_{пот} \sim 2,5\%$ (1,25 - 30%).

4. Коэффициент отведения воды:

$$K_o = \frac{W_{сбр}}{W_{ист}} 100 \leq 100\% \quad (5)$$

$$K_o \longrightarrow 100\%$$

Показатели эффективности использования воды могут различаться даже на предприятиях со схожим производственным процессом.

1.4 Охлаждение оборотной воды

Теплоемкость воды позволяет использовать ее в качестве хладагента для охлаждения оборудования и продукта [6]. Снижение температуры воды происходит за счет передачи тепла воздуху. При этом обеспечивается охлаждение воды до такой температуры, чтобы достигался оптимальный режим работы объекта с выгодными технико-экономическими показателями [2]. Требования к количеству и качеству подаваемой воды определяются характером технологического процесса.

В системах оборотного водоснабжения охладители по способу передачи тепла разделяются [2]:

1) Испарительные. При таком типе охладителя большой объем тепла отводится за счет испарения части воды при непосредственном контакте с воздухом (испарение 1 % воды снижает ее температуру на 6°).

2) Поверхностные (радиаторные). При таком типе охладителя охлаждение воды происходит внутри трубок радиаторов, передавая тепло воздуху через стенки без непосредственного контакта с ним.

Охладители разных типов имеют свои преимущества и недостатки. Например, для понижения температуры воды с 40 до 30°С при температуре воздуха 25°С на 1 м³ охлаждаемой воды к испарительному охладителю должно быть подведено около 1000 м³ воздуха, а к радиаторному охладителю, в котором воздух только нагревается, но не увлажняется,— около 5000 м³ воздуха [2]. При использовании испарительного охладителя охлаждение воды происходит интенсивнее при наименьших расходах воздуха, сопровождаясь немалыми потерями воды на испарение и капельный унос. Также вода загрязняется примесями, происходит концентрация солей при испарении. Главным плюсом

поверхностных охладителей является охлаждение воды без потерь и загрязнения, но с меньшим эффектом охлаждения и большим расходом воздуха [6].

1.4.1 Испарительные охладители

Большая часть охладителей – это охладители испарительного типа, включая такие охладители как водохранилища, пруды-охладители, брызгальные бассейны, испарительные градирни и эжекционные охладители [6]. Они делятся по системе подвода к ним воздуха. Бывают:

– Открытые: водохранилища-охладители (пруды-охладители), брызгальные бассейны, открытые градирни. В них движение воздуха относительно поверхности охлаждаемой воды обуславливается ветром и естественной конвекцией.

– Башенные: башенные градирни. Движение воздуха вызывается естественной тягой, создаваемой высокой вытяжной башней.

– Вентиляторные: вентиляторные градирни. Осуществляется принудительная подача воздуха с помощью нагнетательных или отсасывающих вентиляторов [2].

– Эжекционные. В эжекционных охладителях движение воздуха обусловлено подсосом (эжекцией) его в расширяющуюся струю быстро летящих капель охлаждаемой воды [6].

Площадь зеркала воды водохранилищ-охладителей следует принимать порядка 30 м^2 на $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ охлаждаемой воды [2].

1.4.1.1 Теплообмен в испарительных охладителях

Физическая сущность процесса охлаждения воды в охладителях испарительного типа сводится к процессам теплоотдачи соприкосновением и поверхностному испарению воды. Совместными действиями этих двух процессов объясняется понижение температуры воды. Перенос тепла путем теплопроводности и конвекции, а также превращения части ее в пар и переноса пара путем диффузии и конвекции – эти различные по физической природе

действия и определяют процесс в испарительных охладителях. Причем теплоотдача соприкосновением происходит от среды более теплой к среде более холодной и за счет этого вода отдает тепло, если ее температура выше температуры воздуха, либо получает тепло, если ее температура ниже температуры воздуха [2].

Удельное количество тепла, переданного соприкосновением, определяется по формуле:

$$q_c = \alpha(t - \theta), \quad (6)$$

где q_c — удельное количество тепла в ккал/(м²ч);

α — коэффициент теплоотдачи соприкосновением в ккал/(м²ч°С);

t — температура поверхности воды в °С;

θ — температура воздуха в °С.

Когда парциальное давление пара, содержащегося в воздухе, меньше давления насыщения пара при температуре поверхности жидкости происходит поверхностное испарение жидкости [2].

Удельное количество тепла, теряемого водой в результате испарения, определяется по формуле:

$$q_u = \beta(e_m - e), \quad (7)$$

где q_u — удельное количество тепла в ккал/(м²ч);

β — коэффициент теплоотдачи испарением в ккал/(м²чмм вод. ст.);

e_m — давление насыщения пара при температуре поверхности воды в мм вод. ст.;

e — парциальное давление водяного пара в воздухе (абсолютная влажность воздуха) в мм вод. ст.

Сумма удельных количеств тепла, передаваемого через водную поверхность в результате совместного действия теплоотдачи соприкосновением и поверхностного испарения, равна [6]:

$$q_o = q_c + q_u = \alpha(t - \theta) + \beta(e_m - e) \quad (8)$$

$t > \theta$ — оба процесса действуют в одном направлении, вызывая охлаждение воды

$t = \theta$ — передача тепла соприкосновением прекращается, и охлаждение воды происходит только благодаря поверхностному испарению.

$t < \theta$ — вода будет продолжать охлаждаться до тех пор, пока количество тепла, передаваемого воздухом воде соприкосновением, не сравняется с количеством тепла, теряемого водой в результате испарения. Т. е. пока не будет соблюдаться равенство:

$$q_c + q_u = 0 \quad (9)$$

При испарительном охлаждении может быть достигнута температура воды, более низкая, чем температура воздуха [2].

1.5 Градирни как устройства для охлаждения воды в СОВ

В системах обратного водоснабжения именно градирни используют в качестве наиболее совершенных охладителей.

По принципу охлаждения воды градирни могут быть испарительными и поверхностными. По способу подвода охлаждающего воздуха их делят на открытые, башенные и вентиляторные [50].

В открытых градирнях движение воздуха обусловлено ветром и естественной конвекцией [6]. Такой тип градирен не очень эффективен.

В башенных градирнях движение воздуха обусловлено естественной тягой, создаваемой вытяжной башней. Высота башни рассчитывается таким образом, чтобы в самые жаркие периоды года обеспечить подачу необходимого количества воздуха для эффективного охлаждения воды [6].

В вентиляторных градирнях движение воздуха обусловлено тягой или напором вентилятора. Это самые совершенные градирни.

Башенные и вентиляторные градирни наиболее часто используются в промышленности. Эти два типа сопоставимы между собой. Башенные градирни по капитальным затратам дороже вентиляторных, но дешевле и проще в эксплуатации.

Вентиляторные градирни дешевле и требуют меньшей площади застройки.

Благодаря регулированию производительности вентиляторы обеспечивают

устойчивое управляемое охлаждение воды. Однако для привода вентиляторов требуется значительный расход электроэнергии, а сами вентиляторы нуждаются в постоянном обслуживании, что удорожает эксплуатацию. Выбор этого типа градирни в каждом конкретном случае осуществляется на основании технико-экономического анализа [6].

К поверхностным относятся радиаторные (так называемые «сухие» градирни), охлаждение воды в которых происходит через стенку радиаторов. Движение воздуха в этих градирнях обеспечивается либо вентиляторами, либо за счет тяги, создаваемой башней.

Процесс охлаждения воды в градирне происходит за счет теплопередачи и испарения. Вода передает свое тепло воздуху. Теоретический метод теплового расчета градирни был предложен В. В. Проскуряковым. В его методе оросительное устройство разбивается на участки сечениями, перпендикулярными направлению движения воздуха. Для каждого участка, начиная с нижнего, определяется изменение температуры воды и состояния воздуха (его температуры и влажности) путем подсчета количества тепла, переданного водой воздуху соприкосновением и за счет испарения [2].

Если расход воздуха через градирню неизвестен, то расчет проводится для нескольких значений скорости движения воздуха в оросителе. Действительную скорость движения воздуха в этом случае находят путем сопоставления аэродинамического сопротивления градирни и тяги воздуха.

Общее сопротивление движению воздуха в градирне (аэродинамическое сопротивление) складывается из сопротивления в воздухоподводящих окнах, в оросительном и водораспределительном устройствах и на выходе из градирни. Оно определяется по формуле (10) [2]:

$$h = \xi \frac{v_{cp}^2 \gamma_{cp}}{2g} \approx \xi \frac{v_{cp}^2}{16}, \quad (10)$$

где h — аэродинамическое сопротивление градирни в кгс/м²;

ξ — коэффициент общего аэродинамического сопротивления градирни, отнесенный к скорости движения воздуха в среднем сечении оросителя (брутто);

U_{cp} — скорость движения воздуха в среднем сечении оросителя (брутто, без учета стеснения сечения конструкциями) в м/с;

γ_{cp} — средний удельный вес воздуха в оросителе в кгс/м³.

Охлаждающий эффект градирен возрастает с увеличением контакта воды с воздухом, который достигается различными способами.

Величина тяги в вентиляторных градирнях определяется характеристикой вентиляторов. В башенных градирнях она вычисляется по формуле (11):

$$z = (H_6 + 0,5H_{op})(\gamma_1 - \gamma_2), \quad (11)$$

где z — сила тяги в кгс/м²;

H_6 — высота вытяжной башни над оросителем в м;

H_{op} — высота оросителя в м;

γ_1 — удельный вес наружного воздуха в кгс/м³;

γ_2 — удельный вес воздуха, выходящего из градирни, кгс/м³.

Затем составляют графики зависимости температуры охлажденной воды от тепловой и гидравлической нагрузок и различных метеорологических условий [2].

1.5.1 Открытые градирни

Открытые градирни бывают брызгальные и с капельным оросителем. Первые представляют собой небольшой бассейн, огражденный со всех сторон жалюзийными решетками. Они нужны для того, чтобы минимизировать выброс брызг. Градирни с капельным оросителем имеют ороситель из деревянных брусков, заключенный в жалюзийные стенки, которые выполняются из щитов, устанавливаемых под углом 45° к вертикали [2].

Применяются открытые градирни в СОВ малой производительности и невысоких требованиях к температуре охлажденной воды. Пример открытой градирни с капельным оросителем на рисунке 3.

Башня градирни обычно опирается на рамную конструкцию (колоннаду), между стойками которой проходит воздух, поступающий в градирню. Внизу под оросителем градирни устраивается водосборный резервуар. Резервуар оборудуется трубопроводом с воронкой для перелива излишков воды, а также выпуском для его опорожнения [2].

Подлежащая охлаждению вода подается в водораспределительное устройство по стоякам, размещаемым обычно в центре градирни. Часто в связи с неравномерным распределением воздуха по площади противоточного оросителя применяют и дифференцированную плотность орошения, увеличивая гидравлическую нагрузку на периферии и уменьшая ее в центральной части оросителя [2].



Рисунок 4 – Башенная градирня ООО «БазэлЦемент-Пикалево»

1.5.3 Вентиляторные градирни

Градирни вентиляторного типа бывают башенные и секционные. Башенные вентиляторные градирни оборудуются вентиляторами большой производительности с использованием естественной тяги воздуха [2]. Пример отдельно стоящей одновентиляторной градирни на рисунке 5. Такие градирни имеют площадь от 400 до 1200 м² и применяются в крупных системах оборотного водоснабжения [6]. Вентиляторы с диаметром лопастей от 10 до 18 м устанавливают в горловине башен и приводятся в действие электродвигателем через редуктор и гидромуфту, служащую для изменения частоты вращения вентилятора. Снижением частоты вращения при благоприятных метеорологических условиях достигается сокращение расхода электроэнергии на привод вентиляторов [2].

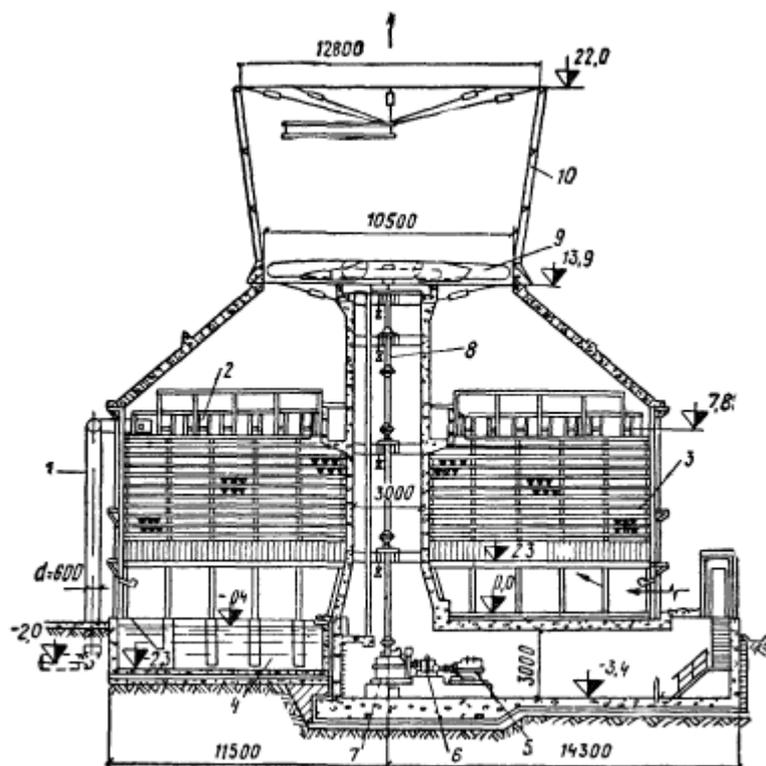


Рисунок 5 [2] – Одновентиляторная градирня: 1 — водоподводящая труба, 2—водораспределительное устройство, 3 — капельно-пленочный ороситель, 4 — водосборный бассейн, 5 — электродвигатель вентилятора, 6 — гидромуфта, 7 — редуктор, 8 — вертикальный вал вентилятора, 9 — лопасти вентилятора, 10—вытяжная башня

Когда требуется постоянная температура охлаждающей воды, то на линиях труб охлаждающей воды устанавливают термодатчики, воздействующие через специальное реле на масляный насос, подающий масло в гидромолот. Это дает возможность автоматически регулировать частоту вращения вентиляторов и, следовательно, расход воздуха через градирню, поддерживая, таким образом, температуру охлаждающей воды на заданном уровне [2].

Наиболее же широкое применение получили секционные вентиляторные градирни (рисунок 6).

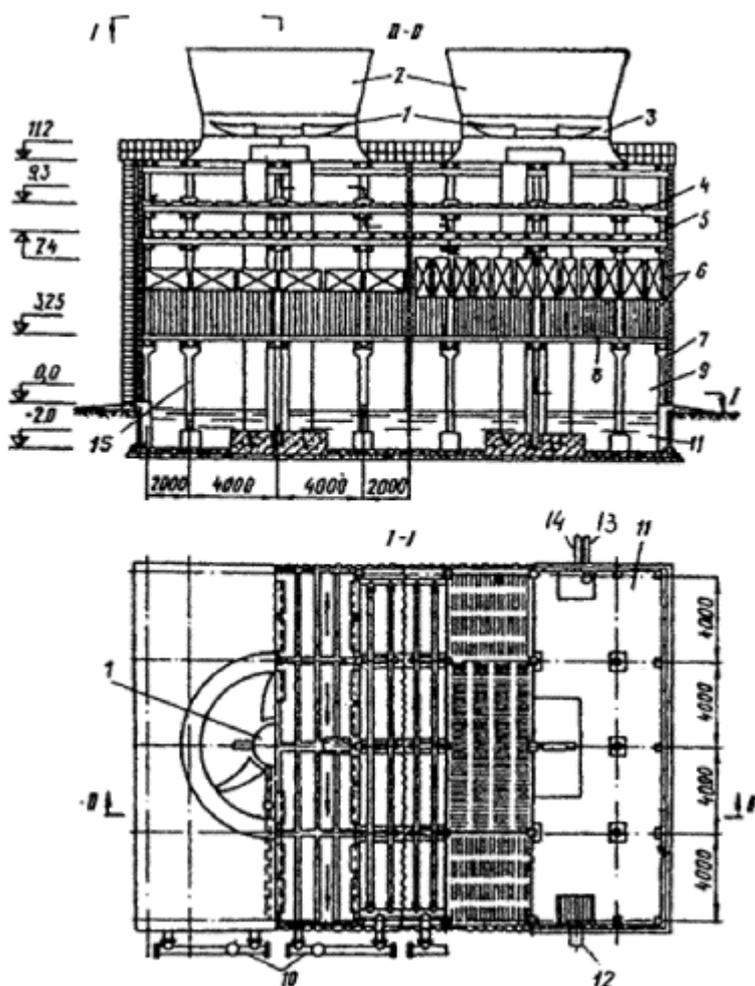


Рисунок 6 [6] – Секционная вентиляторная градирня: 1 - вентилятор; 2 - диффузор; 3 - конфузор; 4 - водоуловитель; 5 - водораспределитель; 6 - ороситель; 7 - обшивка; 8- воздухораспределитель; 9 - окна для входа воздуха; 10 - подача воды к водораспределителям; 11 - резервуар; 12 - трубопровод для отвода охлажденной воды; 13 - переливной трубопровод; 14 - грязевой трубопровод; 15 - каркас

Они состоят из ряда стандартных секций. Воздух в таких градирнях входит с одной стороны или с двух. Каждая секция оборудуется отсасывающим или нагнетательным вентилятором с лопастями диаметром до 10 м и электроприводом. Вентиляторы отсасывающего типа, которые устанавливаются над оросителем, обеспечивают более равномерное распределение воздуха в оросителе и, находясь в зоне теплого воздуха, не обмерзают в зимнее время. Нагнетательные вентиляторы устанавливаются на входном отверстии градирни у ее основания [2]

Секционные градирни дешевле башенных. Наименьшее число секций обычно 2, оптимальное - от 4 до 8. Наличие нескольких секций позволяет создавать наилучшие условия охлаждения воды при изменении количества подаваемой воды в зависимости от климатических условий [6].

1.5.4 Эжекционные охладители

Воздух в эжекционные охладители поступает за счет эффекта эжекции, создаваемого потоком капель охлаждаемой воды, распыленной с помощью специальных форсунок (рисунок 7) [6].

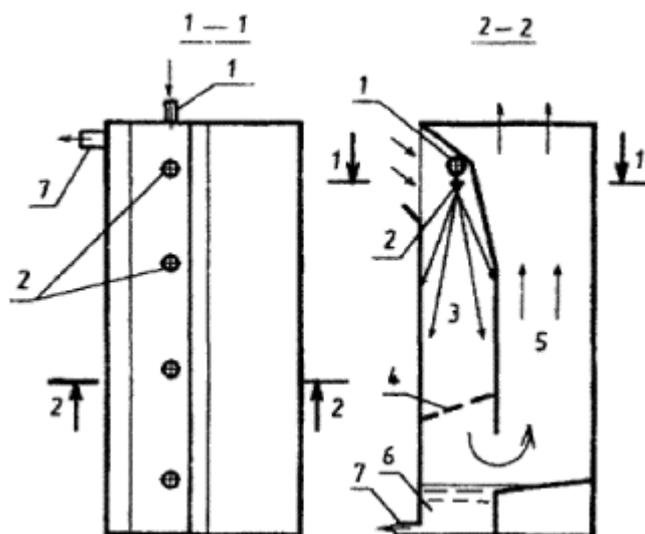


Рисунок 7 [6] – Эжекционный охладитель воды: 1 - подача охлаждаемой воды; 2 - форсунки; 3 - зона контакта воздуха с каплями воды; 4 - дробитель; 5 - зона сепарации; 6 - резервуар охлажденной воды; 7 - отвод охлажденной воды; 8 - вход охлаждающего воздуха; 9 - выход воздуха из охладителя

1.5.5 Радиаторные градирни

Особенность сухих градирен в том, что вода охлаждается воздухом без непосредственного контакта, через перегородку. Пример такой градирни представлен на рисунке 8. Главным преимуществом при выборе сухих градирен является отсутствие потерь воды и ее загрязнения в процессе охлаждения. Минусом же является невысокий эффект охлаждения, при том, что температура охлажденной воды достаточно высока и большой расход воздуха, который необходим для охлаждения воды. Отсюда большие энергозатраты. Стоимость самой градирни тоже немаленькая за счет использования цветных металлов при изготовлении радиаторов [6]. Учитывая эти факторы, сухие градирни целесообразно использовать только там, где наблюдается дефицит воды, либо воды большой стоимости.

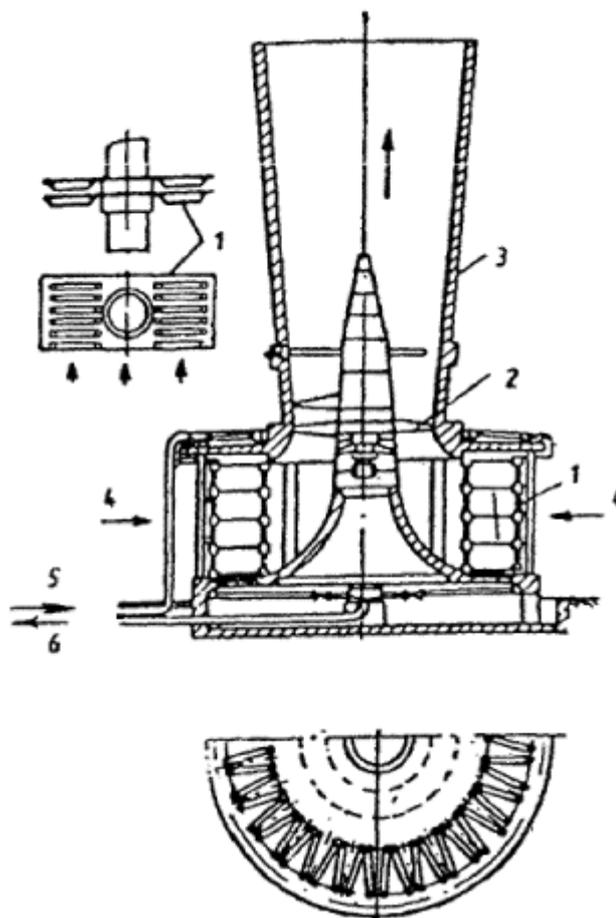


Рисунок 8 [6] – Радиаторная (сухая) градирня: 1 - радиаторы; 2 - вентилятор; 3 - диффузор; 4 - подвод воздуха; 5 - подача воды на охлаждение; 6 - отвод охлажденной воды

Основным элементом сухой градирни (рисунок 8) являются радиаторы, расположенные по ее боковой поверхности. Радиаторы состоят из алюминиевых трубок с насаженными на них алюминиевыми ребрами, которые увеличивают площадь контакта с охлаждающим воздухом, соответственно поверхность теплопередачи и количество отводимого тепла. Охлаждаемая вода по трубопроводам подается в верхнюю часть градирни и движется по трубкам радиаторов сверху вниз. Внизу охлажденная вода собирается в коллектор и без разрыва струи по трубам отводится из градирни [6].

Охлаждающий воздух омывает поверхность радиаторов, двигаясь в направлении, поперечном направлению движения воды, поэтому такая градирня называется поперечно-точной. Охлаждение воды в радиаторных градирнях может быть интенсифицировано путем орошения водой наружной поверхности радиаторов. При этом за счет расходования тепловой энергии на испарение этой воды повышается общее количество тепла, отводимого от градирни. С целью экономии воды орошение радиаторов производится только в наиболее жаркие периоды года [6].

Как было рассмотрено выше, в производствах используются различные виды градирен. В большинстве случаев вода отводит тепло за счет собственного нагрева на величину Δt . При охлаждении воды ее часть теряется. При этом происходит концентрирование солей в воде СОВ и ее загрязнение. Более подробно о проблемах качества воды и требованиях к воде СОВ рассматривается в следующем параграфе.

1.6 Свойства и требования к качеству воды СОВ

Воду в промышленности используют для разных целей и в различных производственных процессах. Соответственно, к воде предъявляются различные требования в зависимости от характера технологического процесса и многих других факторов. Для более детального понимания необходимо разобраться, что такое качество воды и какие требования к нему предъявляются.

Качество воды – совокупность физических, химических, биологических и бактериологических показателей, обуславливающих пригодность воды для использования в промышленном производстве [47].

Работу системы можно оценить критерием качества функционирования системы:

$$I = \int_0^T Q(x - z) dt \quad (12)$$

где x – вектор, характеризующий состояние системы,

z – вектор заданного состояния системы,

Q – вектор-функция, определяемая особенностями и целью функционирования системы [90].

Требования к качеству воды разнообразны для различных категорий водопотребления. Важно соблюдать требования к воде внутри каждой категории, и для разных производств, в количественном и качественном отношении. Очень часто такие требования различаются даже для одной категории. Соблюдать же требования нужно для правильной работы завода. От этого зависит продукция, которая должна соответствовать заявленным характеристикам. Неудовлетворительное выполнение системой водоснабжения поставленных задач может привести не только к ухудшению качества продукции или удорожанию производства, но и в ряде случаев к порче оборудования и даже к опасным авариям [2].

В общем случае все показатели качества воды можно разделить на три группы:

1. Физические (температура, содержание взвешенных веществ, растворенных газов, цветность, запах и др.);
2. Химические (жесткость, щелочность, активная реакция, хлориды, сульфаты, окисляемость, сухой остаток и др.).
3. Биологические и бактериологические (гидробионты, общее количество бактерий, коли-индекс и др.). Показатель, определяющей безопасность ее использования и требующий особенно тщательного контроля при использовании

в промышленном водоснабжении биологически очищенных и доочищенных бытовых сточных вод [12].

Ранее уже говорилось, что наибольший объем воды в промышленности расходуется в процессе охлаждения технологического оборудования, пара, жидких и газообразных продуктов, паровых машин и конденсаторов турбин, доменных и мартеновских печей, вагранок и т.п. [12]. В связи с этим для таких задач целесообразно использование оборотных систем. При этом охлаждающая вода должна соответствовать определенному качеству. Качество определяется конкретной технологией производства, условиями применения, требованиями производителей охлаждаемого оборудования и т.д.

Для достижения поддержания необходимых, стабильных свойств оборотной воды обычно ограничивается максимальная температура нагрева воды и содержание бикарбонатов кальция и магния, общая жесткость воды, содержание взвешенных веществ и их гранулометрический состав, содержание железа, марганца и органических соединений. Отсутствие контроля за водно-химическим режимом оборотной системы гарантировано приводит к различным проблемам в эксплуатации СОВ. Некоторые из них: образования накипи на поверхностях теплообмена, засорения отложениями взвеси или биообрастания холодильных аппаратов и каплеуловителей градирен, а также трубопроводов. Всё это снижает эффективность работы всей системы охлаждения и увеличивает затраты на эксплуатацию [12].

Отличительная особенность охлаждающей воды – зависимость количества воды от качества, и особенно от ее температуры. Охлаждающая вода в процессе использования отводит некоторое количество тепла от оборудования за некоторую единицу времени. И понятно, что при использовании воды с более низкой температурой ее будет требоваться меньше для достижения одинакового охладительного эффекта [2]. Таким образом, мы можем говорить о понятии сезонного расхода воды. Зимой расход охлаждающей воды будет меньше, нежели летом. В очень жаркую погоду при использовании оборотных систем охлаждения воды воздухом очень трудно получить температуру воды меньше 30⁰С.

Огромное значение отводится к требованиям разрешенного содержания различных веществ в воде. Для охлаждающей воды, требования по количеству и составу примесей зависят от размеров каналов, скорости движения воды в них, материала теплообменных аппаратов и температуры стенок охлаждаемого оборудования. Различные примеси не должны откладываться на стенках и засорять трубы [6]. При содержании взвешенных веществ (ВВ) крупностью до 0,05 мм при скорости движения воды в каналах не менее 0,5 м/с должно быть не более 50 г/м³, а при скорости 1,0 м/с может быть 80 г/м³ и даже (кратковременно) - до 200 г/м³ [104]. Одновременно с этим следует помнить, что в СОВ количество ВВ отражается на качестве работы охлаждающего оборудования.

Для предотвращения карбонатных отложения величина жесткости охлаждающей воды зависит от температуры стенок оборудования. Если температура стенок до 80 °С жесткость воды может быть не более 3,0 г-экв/м³, а при температуре стенок свыше 400 °С с огневым нагревом - уже не более 1,5 г-экв/м³ [6]. Следует отметить, что нормативы качества воды для оборотных систем теплоснабжения гораздо выше. Но в оборотных системах водоснабжения, где нет экстремальных температур, возрастающая из-за низкого качества воды, нагрузка на систему равномерно распределяется по всему сроку эксплуатации. Однако, сам срок эксплуатации таких систем снижается в некоторых случаях в 3-4 раза. Срок службы охлаждаемого технологического оборудования так же снижается.

Отслеживание содержания в воде карбонатной временной жесткости (определяется содержанием в воде карбонатных и бикарбонатных солей кальция или магния) и некарбонатной (постоянной) жесткости (определяется кальциевыми и магниевыми солями серной, соляной, азотной и кремниевой кислот) необходимо для предотвращения образования накипи в ОС при нагреве воды. Сумма карбонатной и некарбонатной жесткости составляет общую жесткость воды [12].

При определении в воде солей железа и марганца, а также биогенных элементов азота и фосфора можно говорить о дальнейшем развитии биологических обрастаний теплообменных аппаратов и труб железобактериями и

марганцевыми бактериями [12]. Следствием такой проблемы становится засорение труб теплообменных аппаратов приводящее к уменьшению сечения и уменьшению напора, а также уменьшению коэффициентов теплопередачи и изменению качества воды за счет насыщения ее продуктами жизнедеятельности бактерий.

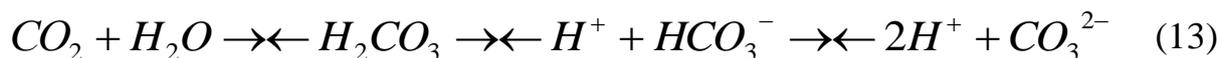
Действие микроорганизмов на металлы может происходить различным путем. Прежде всего, коррозию могут вызывать агрессивные метаболиты микроорганизмов - кислоты, основания, ферменты и др. Они создают коррозионно-активную среду, в которой в присутствии воды протекает коррозия по обычным законам электрохимии. Колонии микроорганизмов могут создавать на поверхности металлов наросты мицелия или слизи, под которыми в результате разности электрических потенциалов на различных участках поверхности металла и ассимиляции ионов металлов самими микроорганизмами может развиваться язвенная коррозия. Биоповреждение металлов под воздействием микроорганизмов может происходить различными путями:

- за счет непосредственного воздействия продуктов метаболизма микроорганизмов на металл;
- через образование органических продуктов, которые могут действовать как деполяризаторы или катализаторы коррозионных реакций;
- путем, при котором коррозионные реакции являются отдельной частью метаболического цикла бактерий. Среди бактерий наиболее часто коррозию металлов связывают с деятельностью сульфатвосстанавливающих бактерий; тионовых бактерий, окисляющих серу и соединения серы до серной кислоты; железобактерий, окисляющих закисное железо до окисного [53].

При повышенном содержании сульфатов и хлоридов вода становится агрессивной по отношению к бетону и углеродистой стали, усиливаются коррозионные свойства, поэтому важно следить за уровнем pH воды.

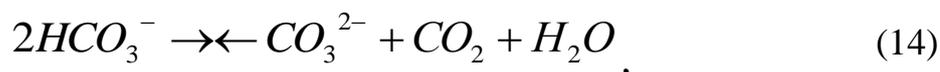
Нельзя не говорить о важной роли содержания в охлаждающей воде растворенных газов. Таких, как кислород, углекислота, сероводород, метан. Углекислота, кислород, сероводород при особых условиях придают воде

коррозионные свойства по отношению к металлам и бетонам. Значительно уменьшает показатели качества воды наличие в ней углекислоты. В зависимости от значения рН воды углекислота находится в воде в виде свободной углекислоты (CO_2) или в виде бикарбонат-ионов CO_3^{2-} . При $pH < 4,5$ бикарбонат-ионы в воде отсутствуют и вся углекислота находится в виде углекислого газа, а при $pH = 8,4$ - только в виде бикарбонатных ионов, при $pH > 10,5$ - только в виде карбонатных ионов [12]. Содержание этих ионов в воде связано углекислотным равновесием:



Если (13) будет нарушено, то в значительной мере будут изменены свойства воды для целей технологического предприятия.

В водных растворах углекислых соединений динамическое равновесие:



где $[CO_2]$ - равновесное количество свободной углекислоты.

Разница между свободной и равновесной углекислотой определяет агрессивную углекислоту. По концентрации агрессивной углекислоты можно судить об агрессивности или стабильности воды по отношению к бетону или металлу. В поверхностных водах присутствие углекислоты исключено, а в подземных оно может быть значительным [12].

Наличие сероводорода и кислорода значительно ускоряет процесс коррозии металлов. Также содержание сероводорода является признаком развития биологических обрастаний трубопроводов и оборудования в системе.

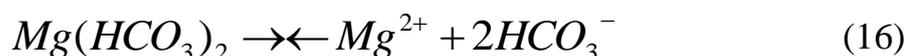
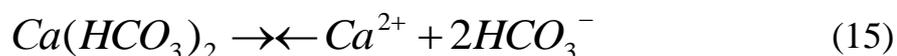
Конкретное качество воды, которая используется на промышленных предприятиях для охлаждения должно определяться с учетом специфических особенностей и для конкретных условий. Порой требования к составу охлаждающей воды очень разнообразны и выше, чем к питьевой. Разные по роду деятельности предприятия предъявляют свои требования к воде [12].

С учетом всего, что было описано выше, можно определить ряд требований к качеству воды для системы обратного водоснабжения [12]:

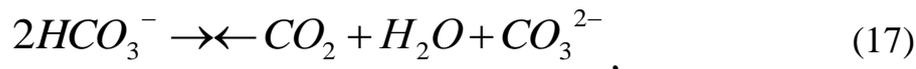
1. Вода, которая применяется для целей охлаждения, не должна приводить к образованию отложений взвеси в трубопроводах и на поверхностях теплообмена. Отложения приводят к уменьшению коэффициентов теплопередачи, сужают поперечное сечение потока, увеличивают сопротивление движению воды и в целом снижают эффективность охлаждения и технико-экономические показатели работы системы охлаждения. Необходимо нормировать не только количество взвеси, но и ее химический состав. Общие требования к химическому составу должны быть увязаны со скоростями движения воды в системе, температур поверхностей теплообмена, солевым балансом СОВ. Для систем различного производственного назначения, как и для различного охлаждаемого оборудования, существуют свои специфические требования.

2. Вода, используемая для целей охлаждения, не должна приводить к биологическим обрастаниям в системе, т.е. образованию и развитию в трубопроводах и холодильниках живых микроорганизмов, микроводорослей, ракушек, мидий, дрейсены и т.п. В оборотных и прямоточных системах охлаждения этому способствует благоприятная температура воды до 45 - 50°C. Биологические обрастания образуют отложения в элементах систем водоснабжения, интенсифицирует процесс выпадения взвеси, изменяют свойства воды и засоряют трубопроводы и холодильники, приводят к коррозии. Снижается эффективность работы охлаждающих устройств оборотной воды и в целом системы промышленного водоснабжения.

3. Вода, используемая для целей охлаждения, не должна вызывать отложений накипи. Образование накипи является следствием высокой температуры воды и содержанием в ней кальциевых и магниевых соединений. Для оборотных систем охлаждения нагревание воды содержащей углекислые соли кальция и магния в технологических агрегатах приводит к диссоциации этих солей:



В свою очередь ион HCO_3^- диссоциирует с образованием:



В результате возрастает концентрация карбонат-ионов в ОВ и ее водородный показатель. При нагревании, а затем охлаждении воды в открытых охладителях углекислый газ уходит из системы. В результате углекислотное равновесие нарушается, возникает избыток ионов CO_3^{2-} . При наличии в воде ионов кальция Ca^{2+} и магния Mg^{2+} образуются нерастворимые соединения, выпадающие в осадок, представляющие опасность отложения на трубках теплообменных аппаратов:



Из опыта практического использования слой накипи в системах охлаждения состоит на 70 - 80% из CaCO_3 и на 20 - 30% из MgCO_3 и SiO_2 . При отсутствии свободных ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в воде и наличии свободной углекислоты вода становится агрессивной по отношению к бетону, происходит его разрушение за счет выщелачивания ионов кальция и магния, входящих в состав бетона.

Наличие взвеси и биологических обрастаний увеличивает интенсивность накипеобразования. Поэтому при значительном накипеобразовании целесообразно сначала обеспечить максимальное снижение концентрации взвеси в воде и устранить причины биологических обрастаний, а уже затем разрабатывать меры борьбы с образованием накипи.

4. Вода, используемая для целей охлаждения, не должна вызывать интенсивную коррозию трубопроводов и оборудования. Скорость коррозии увеличивается при низких рН, повышенном солесодержании и уменьшением жесткости воды, увеличении концентрации хлоридов и сульфатов, кислорода, а также других агрессивных газов CO_2 , H_2S и с повышением температуры и давления воды.

5. Вода, используемая для целей охлаждения, не должна ухудшать условия производства и качество продукции, должна быть кондиционной, т.е.

соответствовать технологическим требованиям, а ее использование не должно приводить к неблагоприятным последствиям, указанным выше.

Классификация охлаждающей оборотной воды по ее способности образовывать накипь в системах водоснабжения при чередовании циклов "нагревание - охлаждение":

- термостабильная. Отсутствие накипи при неоднократном нагреве до 40 - 50°C. Чаще всего карбонатная жесткость такой воды $J_k < 3,5$ мг экв/л;

- условно термостабильная. Отсутствие накипи в первые несколько раз при нагревании/охлаждении, а затем сильное образование накипи. J_k от 3,5 до 5,5 мг экв/л;

- нетермостабильная. Вода сразу образует накипь. Характеризуется высокой карбонатной жесткостью $J_k > 5,5$ мг экв/л.

1.7 Особенности водоснабжения металлургических предприятий

Водоснабжение металлургических предприятий представляет собой сложную систему. На современных заводах каждому цеху делается своя система оборотного водоснабжения из отдельных циклов, количество которых очень часто доходит до 30. Принимая количество СОВ по числу производств, циклы обеспечивают требования к качеству воды и требуемый напор для отдельных цехов (рисунок 9) [2].

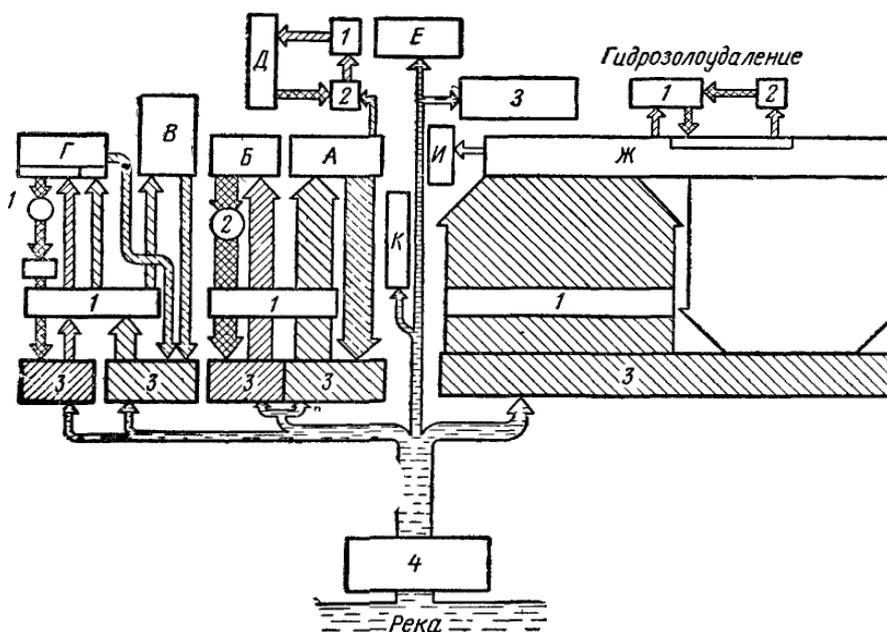


Рисунок 9 - Схема оборотного водоснабжения металлургического комбината: А - доменный цех; Б - газоочистка; В - сталеплавильный цех; Г - прокатный цех; Д разливочные машины; Е - коксохимический цех; Ж - ТЭЦ и паровоздуходувная станция; З - цех огнеупоров; И - химводоочистка; К - прочие цехи: 1 - насосные станции циклов оборотного водоснабжения; 2 - отстойники; 3 - брызгальные бассейны; 4 - насосная станция первого подъема

В комплексе современного металлургического комбината имеются коксохимическое, огнеупорное и другие производства, а также ТЭЦ, паровоздуходувные станции (ПВС), механический, транспортный и другие вспомогательные цеха [12]. На заводах полного цикла выполняется все от выплавки чугуна и стали до изготовления различных изделий. Чугун в свою очередь выплавляют в доменных печах, в которых в виде топлива кокс и природный газ. Сталь выплавляется из чугуна и металлического лома в мартеновских печах, периодически действующих электропечах или конверторах. И уже из стали получают изделия в виде профилей или прокатного стана.

В процессе получения чугуна и стали около 60-70% воды используется для охлаждения печей, а также на конденсацию отработавшего пара на ТЭЦ и ПВС. Также часть воды используют на очистку дымовых газов доменного и сталеплавильного производства, а также на охлаждение прокатных станов, металла, шлака (35 - 25%), остальная вода (до 5%) расходуется на прочие нужды [12].

В состав металлургических комбинатов входят теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) и паровоздуходувная станция (ПВС) при доменном цехе, а также кислородная станция, вырабатывающая кислород для доменного и сталеплавильного цехов, являющиеся наиболее крупными потребителями воды. На паровоздуходувных и силовых станциях вода расходуется на питание и продувку котлов, охлаждение конденсаторов, масле и воздухоохладителей, подшипников, золоудаление, сероочистку и др [12].

Питание котлов осуществляется химически очищенной водой высокого качества, в которой недопустимо присутствие механических примесей и солей жесткости. Полученный в котлах пар, пройдя турбину, поступает в конденсаторы и снова в виде конденсата возвращается в котел. Потери в этом цикле составляют 3 - 5% общего расхода воды, циркулирующей в системе [12].

Продувка котлов с добавкой свежей воды производится для поддержания требуемого состава минеральных примесей. С учетом собственных нужд водоумягчительной установки суммарный расход воды для котлов составляет 0,8 - 0,9 л на 1 кВт мощности [12].

Конденсаторы силовых станций - наиболее крупные водопотребители на металлургических комбинатах. Их значение состоит в сохранении заданного вакуума при выходе пара из турбины, превращении пара в конденсат для возврата его в котел и для удаления воздуха и газа из конденсата. По своему устройству конденсаторы бывают одноходовые и двухходовые [12].

Поскольку большая часть воды идет на охлаждение лимитирующими показателями качества воды являются температура воды, содержание взвешенных веществ и их дисперсный состав, карбонатная и общая жесткость воды и солесодержание [12].

В зависимости от технологических требований к качеству воды и особенностями производства можно выделить несколько групп водопотребителей [12]:

1. Доменные и коксовые печи, нагревательные печи прокатного производства, электроплавильные и мартеновские печи, конвертеры, конденсаторы паровоздуховных станций (ПВС) и теплоэлектростанций (ТЭС), компрессорные и кислородные станции (содержание взвешенных веществ до 20 - 50 мг/л, жесткость карбонатная $J_k < 3$ мг экв/л, температура до 30°C).

2. Кристаллизаторы установок непрерывной разливки стали (содержание взвешенных веществ до 2 - 5 мг/л, $J_k < 1$ мг экв/л, температура до 30°C).

3. Установки по очистке загрязненных газов доменного, сталеплавильного и

агломерационного производства (допускается содержание взвешенных веществ до 150 мг/л).

4. Установки гидротранспорта отходов металлургического производства (зола, шлак, окалина) (допускается содержание взвешенных веществ до 300 мг/л, любая температура и солесодержание).

5. Установки кондиционирования воздуха и санитарно-технические устройства, требующие подачи воды питьевого качества. Основное количество воды на металлургических комбинатах (до 75%) расходуется на охлаждение доменных, сталеплавильных и нагревательных печей и на конденсацию пара на воздуходувных и электрических станциях. Остальная часть воды расходуется на охлаждение оборудования и продукции (газа, металла), а также транспортирование механических примесей и прочие нужды.

1.8 Выводы по главе 1

В данной главе рассмотрена классификация технической воды, используемой на предприятиях промышленности. Большая часть технической воды используется для охлаждения оборудования в качестве теплоносителя. Таким образом, практически всю охлаждающую воду экономически выгодно и целесообразно использовать в качестве оборотной, восполняя лишь малую часть свежей подпиточной. Современные экологические нормы и экономическая целесообразность делают использование СОВ обязательным для предприятий.

Оборотная охлаждающая вода, используемая в системах оборотного водоснабжения, охлаждается с помощью различных устройств. Некоторые устройства испарительного типа были описаны в данной главе. В таких устройствах вода передает накопленное тепло атмосферному воздуху. Чаще всего охлаждение воды происходит при непосредственном контакте воды и охлаждающего воздуха. При этом часть воды теряется с уносом, испарением и т.д. Для соблюдения баланса и восполнения потерь, в систему вводят нужное количество добавочной воды. А в самой СОВ происходит концентрирование солей и загрязнение веществами различного рода.

Возникающие проблемы со свойствами оборотной воды на промышленных предприятиях, в частности металлургических, представляют трудности для работы оборудования и технологического процесса. К воде СОВ предъявляются серьезные условия:

- вода не должна вызывать коррозии;
- не должно происходить биологических обрастаний;
- выпадение взвесей и солевых отложений на поверхностях теплообмена должно быть минимальным;
- вода необходима заданной температуры.

Для решения возникающих в процессе использования воды СОВ проблем предлагается создать автоматизированную систему управления, позволяющую поддерживать необходимые свойства воды.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленных в диссертации задач необходимо произвести ряд мероприятий. Они предусматривают проведение теоретических, экспериментальных исследований, разработку новых решений для создания автоматизированной системы управления качеством воды системы оборотного водоснабжения на металлургическом предприятии. Проведение теоретических исследований заключается в обобщении и систематизации знаний и принципов построения моделей с учетом водного баланса, баланса по количеству тепла и веществ, учитывая количественные потери. Проведение экспериментальных исследований возможно двумя принципиально разными способами. Первый – непосредственно на объекте (в результате натурного эксперимента); второй – по модели. Второй способ является единственно возможным при изучении сложных объектов [8]. Для проведения экспериментальных исследований необходимо создание модели с последующим моделированием процесса.

2.1 Выбор и программа методов исследования

На сегодня контроль качества воды в СОВ на металлургических предприятиях, в большинстве случаев, осуществляется по нерегулярным данным лабораторного анализа, либо отсутствует вовсе. Большинство предприятий не предъявляет серьезных требований по контролю за качеством воды. В некоторых случаях поддержание определенных свойств оборотной воды происходит добавлением реагентов с большим запасом, что приводит к их перерасходу. Дозирование реагентов, с расчётом их концентраций в режиме реального времени с достижением нужного качества воды позволит существенно сократить расходы предприятия. Создание программы, которая позволит оперативно рассчитывать реальную и необходимую концентрацию того или иного реагента в системе, позволит решить проблему нерационального использования ресурсов предприятия. Прежде чем создавать программу необходимо провести ряд

экспериментальных исследований. Часть будет проводиться в лаборатории, а часть на математических моделях после тщательного изучения процесса. Поэтому важно изучить принципы создания моделей и программный пакет для проведения моделирования.

Объект исследования – система оборотного водоснабжения на металлургическом предприятии. Вода в СОВ металлургического предприятия имеет специфический состав и требования к ее качеству. Поэтому исследования обширны и состоят из решения нескольких задач:

- изучение существующих методик за контролем качества воды СОВ;
- изучение данных лабораторных анализов предприятия;
- изучение основных показателей качества воды;
- экспериментальные исследования с целью получение информации о возможности применения датчика электропроводности для определения необходимости продувки СОВ;
- разработка модели в программном продукте MATLAB;
- обобщение сведений и создание АСУ свойствами воды на металлургическом предприятии.

2.2 Экспериментальные исследования

Для коррекционной обработки воды СОВ в диссертационной работе, помимо продувки, предлагается реагентный метод. Реагентная обработка позволяет регулировать свойства воды в системе в соответствии с требуемыми параметрами. Однако, ввиду особенностей оборотной системы, применение лишь этого метода невозможно. В процессе использования системы в ней происходит постоянное повышение общего солесодержания охлаждающей воды, в частности увеличение концентрации бикарбоната кальция по сравнению с исходной водой, как за счет испарения, так и за счет внедрения в систему некоторого количества солей с добавкой свежей воды, восполняющей потери [103].

Степень упаривания характеризуется коэффициентом упаривания(20):

$$K_y = \frac{C_u}{C_o}, \quad (20)$$

где C_u и C_o – концентрация не выпадающих в осадок нелетучих веществ в циркуляционной и добавочной воде.

Выражение (21) определяет режим, при котором не образуется накипи:

$$K_y = \frac{\mathcal{J}_k^u}{\mathcal{J}_k^o}, \quad (21)$$

из (21):

$$\mathcal{J}_k^u = K_y \mathcal{J}_k^o, \quad (22)$$

где \mathcal{J}_k^u , \mathcal{J}_k^o - карбонатные жесткости циркуляционной и добавочной воды.

Например, если фактическая карбонатная жесткость циркуляционной воды $\mathcal{J}_{к.ф.}^u$ меньше расчетной \mathcal{J}_k^u , то это означает, что в СОВ идет выпадение $CaCO_3$ в количестве (23):

$$\Delta \mathcal{J} = K_y \mathcal{J}_k^o - \mathcal{J}_{к.ф.}^u, \quad (23)$$

Для уменьшения накипеобразования следует работать с небольшим коэффициентом упаривания [103]. Снижение коэффициента упаривания можно достичь используя продувку системы, выводя из нее некоторую часть воды.

Продувка СОВ осуществляется двумя путями:

- часть воды уносится в виде капель (капельный унос жидкости);
- часть воды выводится организованно вместе с продувкой и отбором на технологические нужды предприятия.

Сокращение значения продувки приводит к повышению коэффициента упаривания (K_y), следовательно, к значительному росту солесодержания в СОВ.

В работе для контроля продувки системы предполагается использование датчика электропроводности. Однако, в связи с тем, что в СОВ изменяется солесодержание, необходимо провести экспериментальные исследования для обоснованности применения такого датчика за контролем продувки СОВ. Цель экспериментального исследования – получение информации о возможности

применения датчика электропроводности для определения необходимости продувки СОВ, используя индивидуальную зависимость электропроводности от солесодержания воды из конкретного источника.

2.2.1 Лабораторная установка и проведение эксперимента

Методика исследования заключается в проведении лабораторных изысканий на экспериментальной установке, изображенной на рисунке 10. Данная установка состоит из стеклянной лабораторной емкости объемом 1 л (поз.3), которая располагается на нагревательной плитке (поз.4). Выше устанавливается вторая стеклянная лабораторная емкость с крышкой (поз.1), объемом 1 л, оборудованная трубкой с зажимом (поз.2). Такую емкость со сливным краном именуют колбой Бунзена [22]. Вторая емкость располагается так, чтобы вода из нее самотеком поступала в первую емкость.

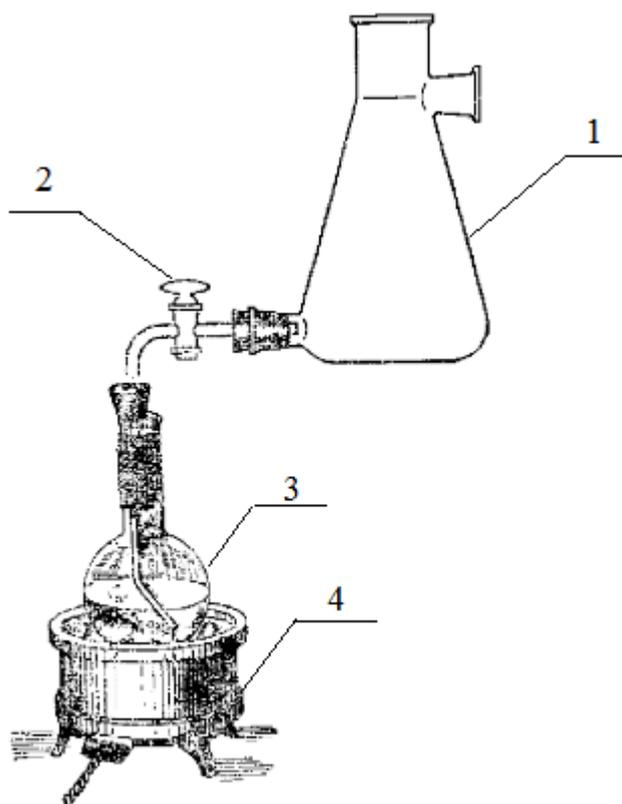


Рисунок 10 – Схема лабораторной установки для исследования: 1- колба Бунзена, 2 – сливной кран с зажимом, 3 – емкость стеклянная лабораторная, 4 – нагревательная плитка

Перед началом работы первую и вторую лабораторные емкости необходимо заполнить водой. После включения плитки и начала кипения воды необходимо отрегулировать зажим на трубке второй емкости таким образом, чтобы из второй емкости с водой в первую емкость поступало количество воды, равное количеству выпарившейся воды. При достижении равновесия можно начинать эксперимент. Проведение экспериментального исследования представлено на рисунке 11.



Рисунок 11 – Проведение эксперимента

Первое измерение параметров солесодержания и электропроводности проводилось сразу. Для этого перекрывался патрубок на второй емкости, первая емкость снималась с плитки. Чтобы проводить измерения вода остужалась до температуры 30°C под крышкой. Измерение электропроводности проводилось кондуктометром марки AquaPro-2 фирмы HM Digital. Солесодержание оценивалось методом измерения сухого остатка в воде.

После проведения первого измерения параметров первая лабораторная емкость с водой снова помещалась на плитку, открывался отрегулированный зажим второй емкости и после закипания воды начинался следующий эксперимент. Перед началом эксперимента фиксировался уровень воды во второй лабораторной емкости. Проведение эксперимента продолжалось до тех пор, пока уровень воды во второй лабораторной емкости не уменьшится до необходимого. По прошествии времени перекрывался патрубок второй емкости, а первая емкость с водой снималась с плитки и вода остужалась под крышкой до температуры 30 °С. После этого производились измерения электропроводности и подготовка пробы воды для определения сухого остатка в аккредитованной лаборатории. Подобным образом проводилось 10 измерений электропроводности и 10 определений сухого остатка за 1 день исследования. Всего данные с лабораторной установки снимались в течении 5 дней, что соответствует 50 измерениям электропроводности и 50 определениям сухого остатка. Все данные представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты проведения экспериментов

Температура, °С	Опыт №1		Опыт №2		Опыт №3	
	СО, мг/дм ³	ЕС, мкСм/см	СО, мг/дм ³	ЕС, мкСм/см	СО, мг/дм ³	ЕС, мкСм/см
30	57	87	61	94	57	83
30	76	117	84	153	79	148
30	97	154	108	186	101	165
30	115	210	130	217	123	198
30	135	216	151	242	143	240
30	157	266	174	299	165	267
30	178	287	198	327	187	295
30	197	365	219	388	199	348
30	217	355	239	413	238	360
30	238	364	258	430	257	402

Продолжение таблицы 5

Температура, °С	Опыт №4		Опыт №5		Среднее	
	СО, мг/дм ³	ЕС, мкСм/см	СО, мг/дм ³	ЕС, мкСм/см	СО, мг/дм ³	ЕС, мкСм/см
30	63	92	59	88	59	89
30	83	120	84	146	81	137
30	102	150	109	157	103	162
30	123	184	136	185	125	199
30	145	261	154	247	145	241
30	163	269	178	256	167	271
30	189	315	192	280	188	300
30	218	348	231	334	212	356
30	241	378	249	348	236	370
30	264	404	267	381	256	396

2.2.2 Методика определения электропроводности воды

Для проведения измерения электропроводности воды (ЕС) при лабораторных испытаниях использовался кондуктометр марки AquaPro-2 (AP-2) фирмы HM Digital, представленный на рисунке 12.



Рисунок 12 - Кондуктометр AquaPro-2

На сегодняшний день для определения общего содержания растворенных солей в воде используют свойство водных растворов проводить электрический

ток. Чем больше в воде диссоциированных молекул, тем выше ее электропроводность [23]. Обычно, чем выше жесткость воды, тем больше ее удельная электропроводность.

Единицей измерения является сименс (См) или микросименс (мкСм). Чаще используют в виде удельной электропроводности в мкСм/см.

Принцип действия AP-2 основан на прямой зависимости электропроводности раствора (силы тока в постоянном электрическом поле, создаваемом электродами прибора) от количества растворенных в воде веществ [23]. Показания прибора при измерении электропроводности (ЕС) выражаются в μS – микросименсах (мкСм); $1 \text{ ЕС} = 10 \mu\text{S}$.

Прибор-анализатор электропроводности и температуры воды состоит из [23]:

- Магнитный корпус прибора с большим LCD дисплеем
- Кнопка "on/off" и "hold"
- Electrodes под защитной крышкой
- Блок питания (1x3V)
- Руководство пользователя

Технические характеристики TDS-метра:

- Элемент питания: 1 x 3V (модель CR2032) в комплекте
- Магнитный, влагозащитный и герметичный корпус
- Срок работы элементов питания: от 1,000 часов
- Функция автовыключения
- Цифровая калибровка нажатием кнопки
- Диапазон измерений температуры воды: 0-80 °C
- Диапазон измерений электропроводности: 0-9999 μS , 0-80°C; 32-176 °F
- Цена деления: 1 μS , 0,1°C/F
- Точность: $\pm 2\%$
- Размеры: 150 x 28 x 13 мм
- Вес: 42,5г

Особенности [23]:

- измерение электропроводности и температуры;
- автоматическая компенсация температуры;
- водонепроницаемый корпус;
- цифровая калибровка нажатием кнопки (без использования отвёртки);
- функция автовыключения для экономии элементов питания;
- кнопка удержания результата;
- индикатор заряда батареи;
- прибор откалиброван на заводе по раствору 700 μS ;
- приятный дизайн;
- защитный колпачок и элементы питания в комплекте;
- поставляется в пластиковом футляре.

2.2.3 Методика определения сухого остатка в воде

Пробы с водой были пронумерованы и отправлены в аккредитованную лабораторию. Для измерения количественного значения солесодержания в воде был выбран метод измерения сухого остатка. Однако, стоит заметить, что солесодержание представляет собой суммарный количественный показатель содержания растворенных в воде веществ. Сухой остаток, который образуется при выпаривании воды, предварительно профильтрованный через бумажный фильтр, состоит из минеральных солей и нелетучих органических соединений [24]. При определении сухого остатка не учитываются более летучие органические соединения. Погрешность в определении солесодержания по сухому остатку невелика и не превышает 10%. Можно пренебречь ей, так как нам важно изучить зависимость, а не точный количественный состав.

Таблица 6 – Лабораторное оборудование для определения сухого остатка [25]

№	Аппаратура, реактивы, растворы
1	Шкаф сушильный с терморегулятором
2	Баня водяная
3	Чашка фарфоровая выпарительная 500-1000 см^3

4	Пипетки без деления 25 см ³
5	Колбы мерные 250 и 500 см ²
6	Вода дистиллированная по ГОСТ 6709
7	Эксикаторы по ГОСТ 25336
8	Весы лабораторные
9	Фильтры

Гравиметрический метод определения сухого остатка основан на определении веса высушенного остатка, полученного после выпаривания пробы.

Проведение анализа выполняют в день получения пробы. Анализ начинается с фильтрования воды через бумажный фильтр и подготовки фарфоровых чашек. Пустые пронумерованные чашки выдерживают в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы, охлаждают в эксикаторе, взвешивают [26]. Далее происходит выпаривание аликвотной части пробы воды (согласно таблице 7) [26]. Выпаривание проводят в подготовленной фарфоровой чашке на водяной бане с дистиллированной водой. Далее оставшуюся часть пробы с сухим остатком помещают в сушильный шкаф нагретый до 110 °С и сушат до постоянной массы [25]. Охлаждают чашку в эксикаторе и взвешивают. Высушивание, охлаждение в эксикаторе и взвешивание повторяют до достижения постоянной массы.

Таблица 7 – Аликвотная часть пробы воды [26]

Диапазон массовой концентрации сухого остатка, мг/дм ³	Объем аликвотной части пробы, см ³
От 50 до 500 вкл.	100
Свыше 500 до 1000 вкл.	50
Свыше 1000 до 10000 вкл.	25

Величину сухого остатка X в мг/дм³ вычисляют по формуле (24):

$$X = \frac{(m - m_1)1000}{V}, \quad (24)$$

где m – масса чашки с сухим остатком, мг;

m_1 – масса пустой чашки, мг;

V – объем воды, взятый для определения, см³.

Данный способ определения сухого остатка позволяет получать результаты с погрешностью, не превышающей значений в таблице.

Таблица 8 – Значения показателей точности методики [26]

Диапазон измерений, мг/дм ³	Показатель точности (границы относительной погрешности при вероятности $P = 0,95$), $\pm ?$, %	Показатель повторяемости (относительное среднеквадратическое отклонение повторяемости), s_r , %	Показатель воспроизводимости (относительное среднеквадратическое отклонение воспроизводимости), s_R , %
от 50 до 200 вкл.	19	8	9
св. 200 до 5000 вкл.	9	3,5	4
св. 5000 до 25000 вкл.	5	1,4	2,5

2.3 Обработка экспериментальных данных

При проведении экспериментальных исследований ставилась задача выявления качественно-количественных закономерностей, определяющих зависимости между переменными. Данные, полученные при проведении эксперимента, записаны в таблицу 9. Для обработки данных используют различные методы. Решение поставленной задачи будет оцениваться методами:

- графического анализа;
- оценка коэффициента упаривания;
- корреляционный анализ.

Обработка результатов экспериментальных данных графическим методом производилась в Microsoft Excel. По данным таблицы 5 были построены 5 графиков зависимости сухого остатка от электропроводности воды на основе данных пяти экспериментальных исследований. Результаты приведены на рисунках 13-17.

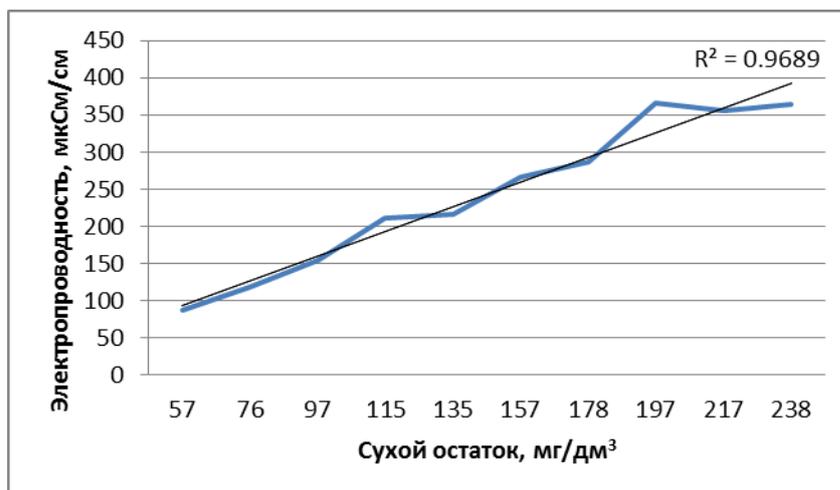


Рисунок 13 – График зависимости электропроводности от сухого остатка в №1 опыте

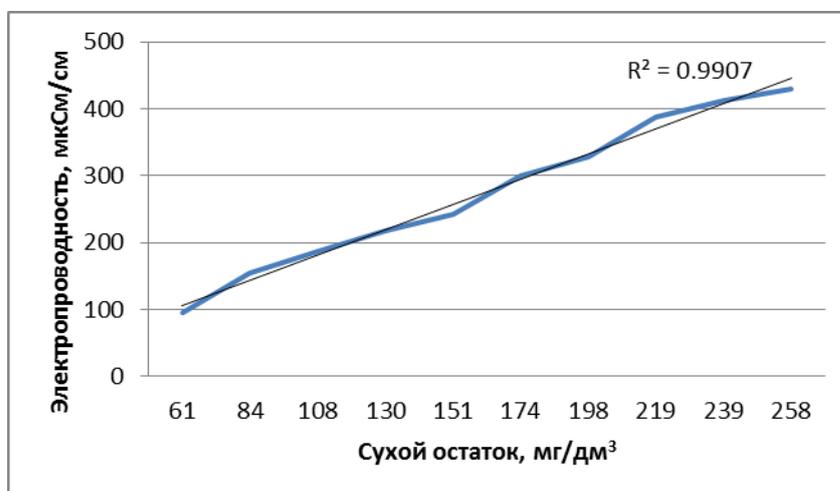


Рисунок 14 – График зависимости электропроводности от сухого остатка во №2 опыте

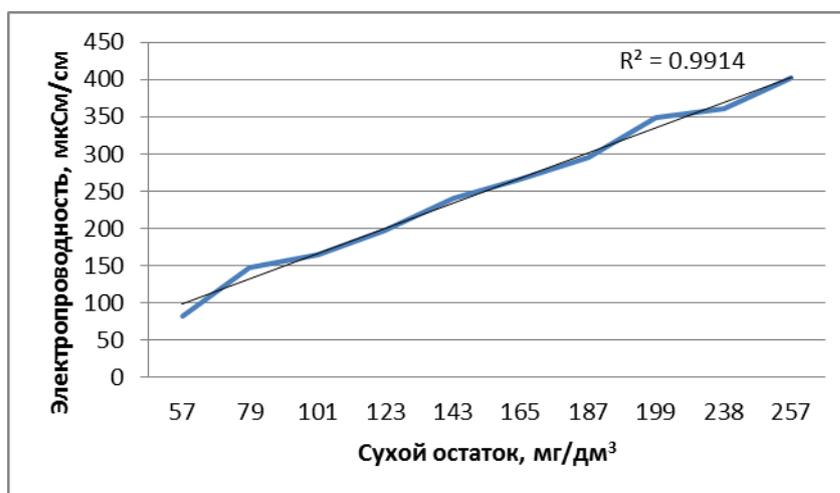


Рисунок 15 – График зависимости электропроводности от сухого остатка в №3 опыте

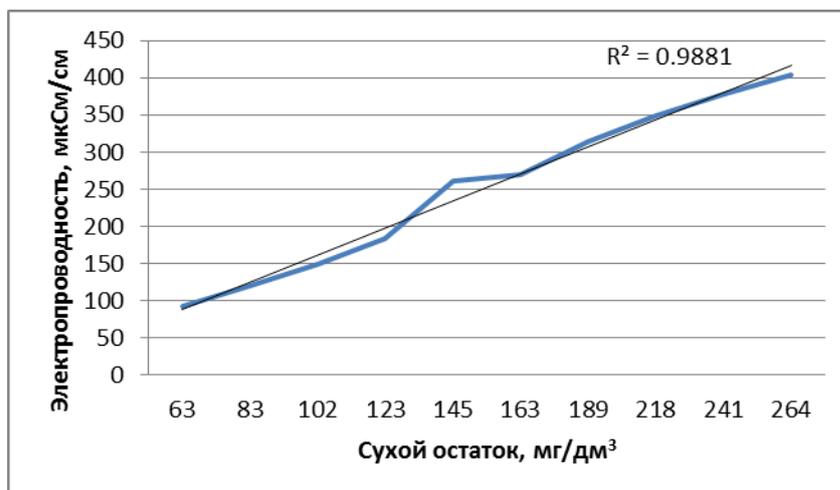


Рисунок 16 – График зависимости электропроводности от сухого остатка в №4 опыте

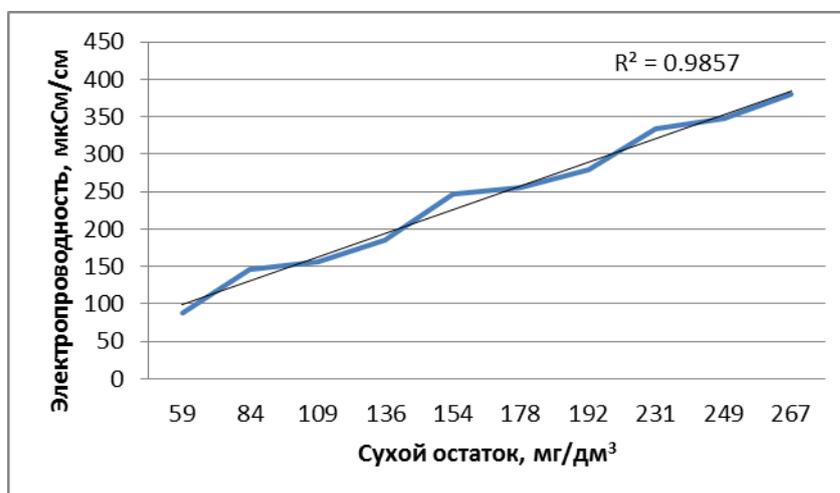


Рисунок 17 – График зависимости электропроводности от сухого остатка в №5 опыте

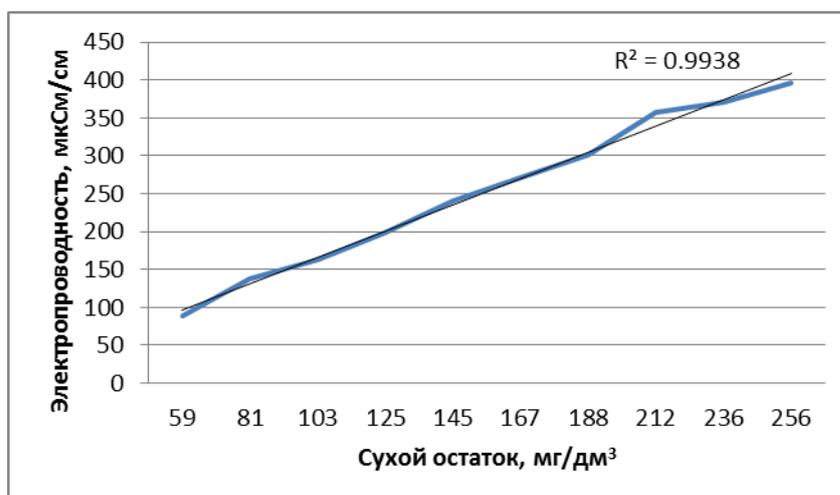


Рисунок 18 – График зависимости электропроводности от сухого остатка при усредненных значениях пяти экспериментов

Также из таблицы 5 видно, что были взяты усредненные данные, на основе которых был построен график 18.

На графиках построена линия тренда, а также показано численное значение величины достоверности аппроксимации. Визуальный анализ графиков позволяет судить об определенной зависимости между искомыми величинами.

Следующим шагом оценки достоверности данных был рассчитан коэффициент упаривания по уравнению (20). Данные расчета представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Значения коэффициента упаривания

Увеличивающееся время проведения эксперимента	K _y					
	Опыт №1	Опыт №2	Опыт №3	Опыт №4	Опыт №5	Среднее
	1	1	1	1	1	1
	1.33	1.38	1.39	1.32	1.42	1.37
	1.7	1.77	1.77	1.62	1.85	1.75
	2.02	2.13	2.16	1.95	2.31	2.12
	2.37	2.48	2.51	2.3	2.61	2.46
	2.75	2.85	2.89	2.59	3.02	2.83
	3.12	3.25	3.28	3	3.25	3.19
	3.46	3.59	3.49	3.46	3.92	3.59
	3.81	3.92	4.18	3.83	4.22	4
	4.18	4.23	4.51	4.19	4.53	4.34

2.3.1 Корреляционный анализ

Корреляционный анализ - метод, который позволяет оценить тесноту зависимости между несколькими случайными величинами. Если две случайные величины связаны статистической зависимостью и при изменении одной меняется распределения другой, то она называется корреляционной.

При изучении зависимость физической величины случайной величины Y от величины X анализу подвергались N пар чисел (y_i, x_i) , полученных в ходе

независимых опытов. Эти данные позволяют оценить тесноту линейной связи между величинами X и Y , представленной в следующем виде [30]:

$$Y = m_y + r_{yx} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (X - m_x) = a_0 + a_1 X, \quad (25)$$

где m_x и m_y – соответственно математические ожидания величин X и Y ; σ_y и σ_x – средние квадратические отклонения этих величин; r_{yx} – коэффициент корреляции,

$$r_{yx} = \frac{k_{yx}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (26)$$

где k_{yx} – корреляционный момент случайных величин X и Y .

Величина коэффициента корреляции r_{yx} изменяется в пределах от -1 до +1 и служит характеристикой тесноты линейной связи между X и Y . Чем ближе величина r_{yx} по абсолютному значению к единице, тем эта связь теснее [45].

Для того, чтобы оценить экспериментальные данные методом корреляционного анализа и оценить тесноту полученной зависимости электропроводности от сухого остатка в программном пакете Microsoft Excel был рассчитан коэффициент корреляции. Результаты представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Значения коэффициента корреляции для 5 опытов и среднего значения

№ опыта	1	2	3	4	5	Среднее
Коэф. корреляции	0.983	0.996	0.990	0.991	0.993	0.996

Из данных таблицы 10 видно, что корреляционные зависимости имеют значение близкое к 1, что свидетельствует о достаточно тесной связи между данными электропроводности и сухого остатка.

Обобщая все рассмотренные выше результаты обработки данных на основе экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что для определения необходимости продувки можно использовать датчик электропроводности.

Рекомендуется предварительно провести эксперименты, подобные описанному в данной главе, с целью выявления зависимости электропроводности от сухого остатка воды при конкретных условиях производства. Проведение экспериментов для каждого конкретного случая, позволяет учитывать все факторы, способные влиять на зависимость электропроводности и солесодержания.

2.4 Принципы построения моделей

Цель экспериментальных исследований СОВ состоит в получении и обработке информации о будущем объекте для внедрения системы. Проведение опытов на реальном технологическом объекте не представляется возможным по нескольким причинам. Главная из них – возможное нарушение процесса, ведущая к потере качества и, как результат, большим экономическим затратам. Единственным возможным вариантом для изучения был выбран метод моделирования.

Моделирование – процесс замещения исходного объекта (оригинала) другим объектом (моделью). Метод моделирования, как метод научного исследования, заключается в том, что необходимые знания об изучаемых объектах получают на основе изучения некоторых других объектов, замещающих интересующие объекты на некоторых этапах познания. Эти объекты называются моделями (от лат. *modulus* - мера). Исходные объекты, являющиеся целью изучения, называются оригиналами [8]. Таким образом, модель - это объект-заместитель объекта-оригинала, позволяющий изучить некоторые свойства последнего. Теория, на основе которой происходит замещение объектов-оригиналов их моделями, называется теорией моделирования [8]. Можно говорить, что моделирование возможно на основе аналогии, т.е. в процессе изучения оригинала по его модели модель рассматривается как самостоятельный объект, на основании эксперимента с которым удастся получить знания о самом объекте.

Прежде чем приступить к моделированию, необходимо сформулировать цель и понять, для чего нужна модель. Создавая модель объекта, исследователь

познает объект, т. е. выделяет его из окружающей среды и строит его формальное описание [106]. Модель нужна для того, чтобы понять, как устроен конкретный исследуемый объект, каковы его структура, внутренние связи, основные свойства, законы развития, саморазвития и взаимодействия с окружающей средой [4].

Основные цели моделирования: описание объекта, объяснение объекта, прогнозирование поведения и свойств объекта.

Прогнозирование поведения и свойств объекта является частью главной цели – управления качеством воды СОВ на металлургическом предприятии, определяя по модели оптимальные управляющие воздействия при заданных целях и критериях. А также для прогнозирования последствий различных воздействий на СОВ [106].

Различают два основных вида моделирования: физическое и математическое.



Рисунок 19 - Классификация видов моделирования [5]

Физическое моделирование

В этом случае физическая природа процессов, происходящих в модели и в объекте, одинакова и они отличаются только размерами или темпом процессов, происходящих в модели в объекте [40,90].

При физическом моделировании требуется создание опытной установки, которая бы имитировала процесс. При этом соблюдение размеров не обязательно. Главным понятием в физическом моделировании является подобие. Для получения верных результатов при моделировании необходимо обеспечить физическое подобие модели изучаемому объекту. Основным недостатком такого

моделирования является экономическая составляющая. Порой очень большие затраты приходится на проектирование и создание модели.

Математическое моделирование

В этом случае физическая природа процессов, происходящих в модели и в объекте, может быть совершенно различна, но оказываются одинаковыми уравнения, описывающие изменение процессов в модели и в объекте [40,90].

Например, перенос вещества описывается законом Фика:

$$j_M = -D \cdot \frac{dc}{dx}, \quad (27)$$

Перенос тепла описывается уравнением Фурье:

$$j_T = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (28)$$

Перенос электричества описывается законом Ома:

$$j_\varepsilon = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dU}{dx}, \quad (29)$$

Имея одинаковую структуру уравнения (27) – (29) состоят из двух сомножителей. Первый из них - коэффициент пропорциональности процесса, а второй является величиной градиента концентрации (с) температуры (Т), или напряжения (U) в направлении потока. Уравнения (27) – (29) являются математической моделью этих трех процессов, описывают их основные свойства – а именно, способность к переносу различных субстанций в поле распределения соответствующей величины в пространстве. Эти три процесса имеют одинаковую математическую модель. Каждое из трех рассмотренных явлений может быть моделью для исследований процессов переноса [40,90].

Математическое моделирование предполагает эксперименты с математическими моделями явлений. ММ – это логический объект. ММ – упрощенный образ изучаемого явления, записанный с помощью математической символики. Эксперименты проводят на ММ. Данный вид моделирования позволяет проводить эксперименты практически на любых объектах [5].

Основное требование при любом моделировании – адекватность рассматриваемого явления. Она должна достаточно точно отражать характерные черты явления, обладать простотой и доступностью исследования [97].

Имитационное моделирование заключается в имитации на ЭВМ процесса функционирования и структуры исследуемого объекта [17] без четкого детального описания объекта. Исследователю необходимо определить только основные данные, необходимые для дальнейшей работы. Особенность работы с имитационной моделью – использование в качестве исходной информации не только теоретических и экспериментальных данных, но и интуитивных. Информация может быть получена заранее или в процессе исследования. При имитационном моделировании существенную роль играет человек [9].

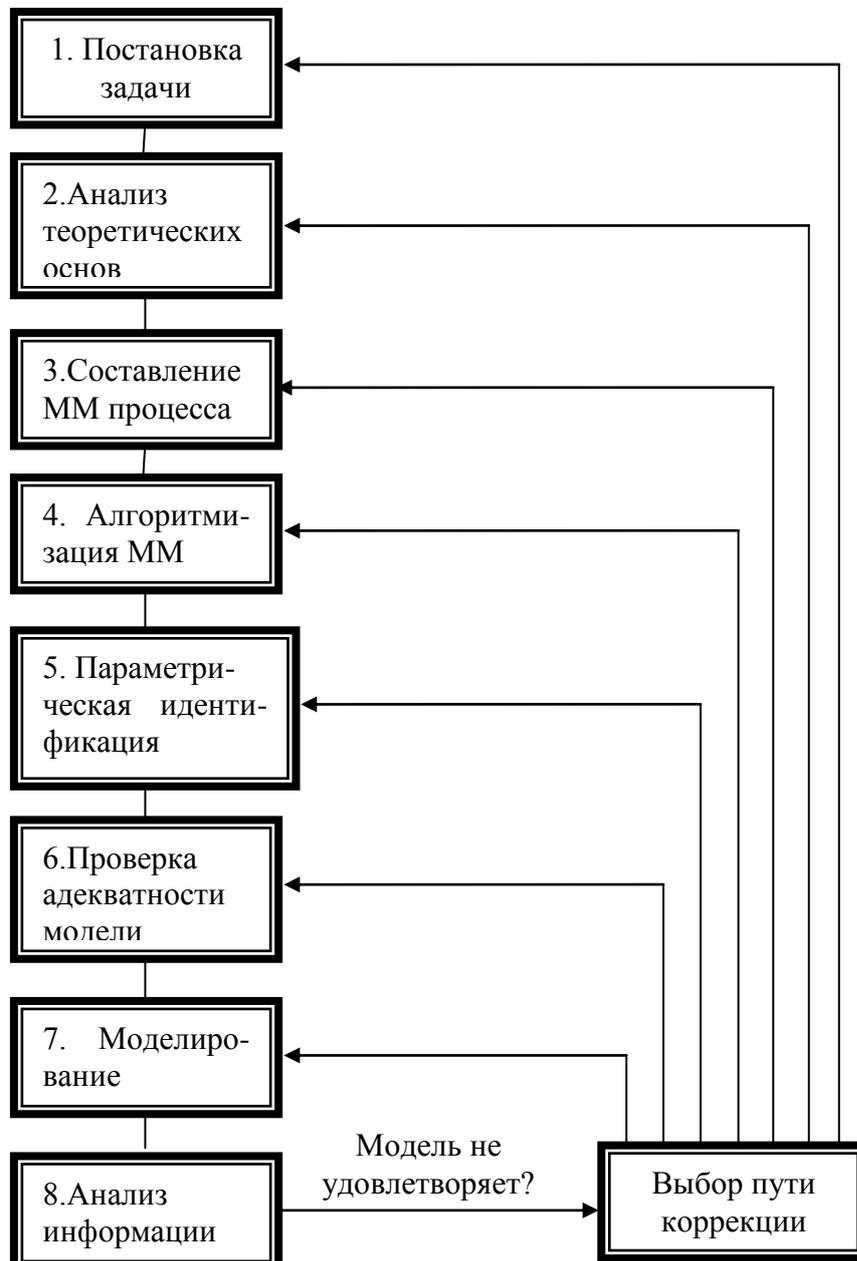


Рисунок 20 - Общая схема процесса математического моделирования

Общая схема процесса математического моделирования включает 8 последовательных этапов (рисунок 20) [5, 18, 97]:

1. Постановка задачи. Поставка задачи определяет цель и пути решения. Перед разработкой решения задачи необходимо достаточно полно уяснить природу данной конкретной задачи. Чем глубже будет ясна физическая сущность явления, тем правильнее будет составлена физическая модель изучаемого процесса. На этом этапе происходит выбор свойств для отражения их в модели.

2. Анализ теоретических основ процесса (составление физической модели процесса). На данном этапе определяют фундаментальные законы, лежащие в основе данного процесса. Если не удастся подобрать удовлетворительную теорию, можно прибегнуть к разработке гипотез. Справедливость их должна быть проверена путем сравнения результатов решения ММ, построенной на основе принятых гипотез, с экспериментальными данными.

3. Составление ММ процесса. На основе выбранной физической модели составляют систему соответствующих математических уравнений – ММ процесса. Построение ММ заключается в создании формализованного описания объекта исследования на языке математики в виде некоторой системы уравнений и функциональных соотношений между отдельными параметрами модели.

Физико-химическая детерминированная модель состоит из трех групп уравнений:

- уравнения балансов массы и энергии, позволяющая определить потоки массы и теплоты, изменение физико-химических свойств системы (вязкости, теплоемкости и т. п.) в связи с изменением температуры и состава;

- уравнений состояния (фазовые равновесия и т. п.);

- кинетических уравнений; к этой группе относятся описания кинетики тепло- и массопереноса, химической кинетики и т. д.

Прежде чем включить уравнение в ММ процесса, нужно оценить влияние входящих в него переменных на конечные результаты решения задачи и по

возможности заменить слабо влияющие переменные постоянными средними величинами.

4. Алгоритмизация ММ. Если процесс несложный, то описывающую систему уравнений можно решить аналитически. Если ММ представляет собой сложную систему дифференциальных уравнений, то для выбора эффективного алгоритма решения необходимо учитывать многие факторы: тип уравнений, входящих в систему математического описания модели, размерность задачи и т. п. Также провести анализ задачи, который должен подтвердить существование и единственность решения.

После составления полного математического описание модели, выбирают метод решения, который представляется наиболее приемлемым, разрабатывают его во всех деталях и записывают в виде алгоритма. Затем алгоритм нужно изложить на одном из языков программирования, т.е. составить программу для ЭВМ.

5. Параметрическая идентификация модели. Параметры ММ – коэффициенты, учитывающие те или иные особенности объекта – природы и характеризуют свойства данной природы, отличающие ее от других натур подобного класса. Чем больше параметров входит в модель, тем подробнее и точнее удастся описать и охарактеризовать данную природу. Основными недостатками многопараметрических ММ являются: трудность обработки таких моделей и высокая чувствительность к экспериментальным ошибкам.

6. Проверка адекватности ММ. После построения модели необходимо проверить насколько верно описывает модель качественные и количественные характеристики объекта моделирования. Для этого проверяют адекватность модели. Адекватность модели проверяется путем сопоставления результатов моделирования с результатами наблюдения за характеристиками системы в процессе ее функционирования. Адекватность модели зависит от того, насколько справедливы упрощения, сделанные при формулировке модели. Если модель адекватна, ее можно использовать для дальнейшего анализа поведения моделируемого объекта и системы в целом. Если модель не адекватна,

необходимо либо пересмотреть значения параметров модели. Это так называемая параметрическая идентификация. Либо пересмотреть структуру модели. Эта процедура называется структурной идентификацией модели [90].

7. Моделирование процесса. Этот этап заключается в решении на ЭВМ ММ процесса при варьировании параметров процесса в интересующем для данного исследования диапазоне.

8. Анализ полученной информации. Заключительный этап решения задачи сводится к изучению и проверке результатов, полученных при решении ММ. При этом любому (даже не предполагаемому заранее) решению необходимо дать рациональное объяснение, чтобы гарантировать отсутствие ошибок, которые могут возникнуть в результате вычислений.

Исследуя реальный процесс, нужно учитывать, что параметры в силу различных причин не остаются постоянными, причем они могут меняться в довольно широком диапазоне. Поэтому исследование процесса нужно проводить при различных изменениях параметров и их комбинаций [18].

При проведении такого анализа преследуются три основные цели [18]:

- исследовать поведение модели при варьировании изменяющихся параметров;

- определить, является ли данная модель работоспособной при варьировании изменяющихся параметров и, соответственно, определить пределы работоспособности модели;

- скорректировать модель с целью расширения диапазона ее работоспособности и улучшения ее эксплуатационных характеристик.

2.5 Балансы в системе оборотного водоснабжения

Обладая только знаниями в области построения моделей нельзя смоделировать процесс правильно. Для моделирования нужно изучить сам технологический процесс. Объектом моделирования является СОВ. В каждой функционирующей оборотной системе водоснабжения промышленного

предприятия должны соблюдаться балансы: по количеству воды; по количеству тепла; по количеству веществ (примесей воды) [6].

Водный баланс

Для правильной работы металлургического предприятия количество воды в СОВ постоянно, сумма потерь воды равна сумме поступления (30).

$$\sum Q_{пост} = \sum Q_{уб} \quad (30)$$

Водный баланс может оказывать серьезное влияние на стоимость продукции. Все потери воды в СОВ восполняются добавочной водой. В таблице 11 показаны возможные варианты поступающей воды в систему и убывающей. Зачастую комбинации составления водного баланса из потоков входящей и выходящей воды различны и зависят от технологического процесса предприятия.

Таблица 11 – Поступление и убыль воды в системе водоснабжения предприятия [12]

Поступление воды в систему	Убыль воды из системы
1. С исходным сырьем и полуфабрикатами $Q_{сыр}$	1. Унос с продуктами и отходами $Q_{б.п.}$
2. С вспомогательными веществами (топливо, реагенты и т.п.) $Q_{всп}$	2. На полив полов, проездов, зеленых насаждений $Q_{пол}$
3. С атмосферными осадками (дождь, таяние снега) $Q_{атм}$	3. На испарение в охладителе оборотной воды $Q_{исп.хол}$
4. В виде шахтного или рудничного водоотлива, почвенная (дренажная), инфильтрационная и пр. $Q_{подз}$	4. Унос воздухом из охладителя оборотной воды $Q_{ун}$
5. Из источника водоснабжения $Q_{исп}$	5. Испарение естественное с водной поверхности $Q_{исп.ест}$
6. Сточная вода, повторно используемая после очистки $Q_{ст.повт}$	6. Транспирация растительностью водоема $Q_{трансп}$
	7. Эксфильтрация из системы водоснабжения в почву $Q_{эксф}$
	8. Сброс воды в водоем для освежения оборотной воды (продувка) $Q_{сбр}$
	9. Сброс собственно сточных вод в водоем или другие приемники их $Q_{сбр.ст}$
$\sum Q_{пост}$	$\sum Q_{уб}$

$$Q_{пост} = Q_{сыр} + Q_{всп} + Q_{атм} + Q_{подз} + Q_{исп} + Q_{ст.поет}. \quad (31)$$

Все многообразие суммарного поступления воды (31) включает в себя: воду, приходящую с исходным сырьем, полуфабрикатами и вспомогательными веществами (количество такой воды определяет технолог, производя необходимые расчеты), с атмосферными осадками, причем в СОВ поступает такая вода когда имеются открытые резервуары большой площади (необходимо учесть периодические поступления).

Использование в СОВ очищенных сточных вод значительно минимизирует объемы свежей подпиточной воды из источника, сокращает сбрасывание сточных вод в водоемы. При таком использовании сточной воды обязательным является соблюдение санитарных норм. Такой прием часто применяют при создании замкнутых систем водного хозяйства промышленных предприятий.

$$Q_{уб} = Q_{б.п.} + Q_{пол} + Q_{исп.хол} + Q_{ун} + Q_{исп.ест} + Q_{трансп.} + Q_{эксф} + Q_{сбр} + Q_{сбр.ст} \quad (32)$$

Потери воды в СОВ (32) включают: безвозвратные потери (определяются технологическим процессом), потери на полив территории (зависят от площади и норм объемов воды на полив), на капельный унос (зависят от типа охладителя, около 0,1 % - 0,2 %), потери воды на очистных сооружениях (определяются технологической схемой очистки воды).

Количество воды на продувку зависит от концентрации минеральных солей в циркуляционной воде. Продувка системы эффективна лишь в том случае, если концентрация солей в подпиточной воде значительно ниже допустимой концентрации солей в воде оборотной системы [6].

Принципы составления водного баланса промышленного предприятия [12]:

1. Количество воды в системе промышленного водоснабжения поддерживается постоянным. Убыль воды из системы возмещается добавляемой водой.
2. Устанавливаются источники поступления и убыли воды.
3. Определяются количественные характеристики каждого источника.

4. Анализируются качественные характеристики воды источников и их возможное влияние на состав и свойства оборотной воды, эффективность работы системы водоснабжения.

5. Определяются группы потребителей, требующих воду одинакового качества.

6. Для уменьшения количества свежей воды, забираемой из источника, выявляется возможность последовательного использования отработавшей воды одной группы потребителей для водоснабжения другой.

Баланс по количеству примесей

Как и количество воды в СОВ количество примесей в ОВ должно быть постоянным. Обеспечение такого условия представляется довольно сложным, ведь для его обеспечения все примеси, которые добавились или образовались в процессе использования воды, необходимо удалить. Решение проблемы баланса по количеству примесей в СОВ является важной задачей, она обуславливается огромным разнообразием примесей, появляющихся в воде и сложностью их удаления.

Большой проблемой СОВ при использовании охлаждающих устройств является концентрация минеральных солей, растворенных в циркулирующей воде оборотной системы водоснабжения, которая повышается в результате испарения части воды в охладителях [2]. При достижении определенной степени концентрации растворенные соли жесткости могут выпадать и образовывать карбонатные отложения, резко снижающие коэффициент теплопередачи и ухудшая работу оборудования. Поэтому, чтобы сдерживать количество солей в определенном диапазоне используют продувку, систематически выводя часть солей из системы. А водный баланс, как уже говорилось, восполняют добавочной водой.

Содержание солей в циркулирующей воде оборотной системы стабилизируется, если количество солей, удаляемых из системы при продувке и в результате капельного уноса из охладителей, будет равно количеству солей, приносимых с подпиточной водой [2]:

$$C_{доб}(p_1 + p_2 + p_3) = C_{цирк}(p_2 + p_3) = C_{цирк}(P - p_1), \quad (33)$$

где $C_{доб}$ и $C_{цирк}$ - концентрации солей в оборотной и добавочной воде в мг экв/л; p_1 - потери воды в охладителях на испарение в %; p_2 - потери воды на унос с воздухом в %; p_3 - потери воды, сбрасываемой из системы для продувки в %.

Минимальный продувочный расход можно определить по формуле (34), если концентрацию солей жесткости принять максимально допустимой [2]:

$$p_3 = \frac{C_{доб}P}{C_{цирк.макс}} - p_2, \quad (34)$$

где $P = p_1 + p_2 + p_3$ - суммарный расход добавочной воды в % от расхода оборотной воды.

Если при расчете требуются большие расходы подпиточной воды с ее обработкой, то можно рассматривать вариант с предварительным обессоливанием подпиточной воды, либо применяться другие методы борьбы с отложениями в оборотных системах. Помимо солей в СОВ в теплообменных аппаратах могут образовываться отложения различной природы.

Эффективность использования воды промышленными предприятиями оценивается коэффициентом использования свежей воды из источника и коэффициентом использования оборотной воды. Для совершенной системы они стремятся к единице.

Баланс по количеству тепла

При охлаждении водой в СОВ происходит поступление тепла за счет собственного нагрева воды на температуру Δt . Количество тепла, тыс. кДж/ч, поступающего за счет нагрева воды, может быть определено из выражения (35):

$$Q_1 = C\Delta t Q_{об}, \quad (35)$$

где C - удельная теплоемкость воды ($C = 4,19$ кДж/кг $^{\circ}\text{C}$); $Q_{об}$ - производительность оборотной системы, м³/ч; Δt - перепад температур, $^{\circ}\text{C}$.

Равенство баланса по теплу в ОС достигается за счет отведенного количества тепла в атмосферу при охлаждении воды на ту же величину Δt в специально предусмотренных для этих целей охлаждающих устройствах.

2.5.1 Потери воды в охладителях

В формуле (29) уже упоминалось, что при охлаждении часть воды теряется. Основные потери могут быть рассчитаны в количественном отношении.

Потери воды на испарение в охладителях находят из выражения (36) [6].

$$Q_{исп} = K_1 \Delta t Q_{об}, \quad (36)$$

где K_1 - коэффициент потерь воды на испарение, учитывающий долю теплоотдачи испарением в общем процессе теплопередачи в охладители; $Q_{об}$ - количество воды, подаваемой в охладитель, м³/ч.

Таблица 12 – Значения коэффициента К [2]

Сезон года	Коэффициент К	
	Для водохранилищ-охладителей	Для брызгальных бассейнов и градирен
Лето	0,1-0,13	0,13-0,15
Весна и осень	0,08-0,09	0,11-0,12
Зима	0,06-0,07	0,09-0,1

Потери воды на унос вместе с воздухом в процентах от циркуляционного расхода приведены в таблице 13 [2].

Таблица 13 – Значения коэффициента К [2]

Тип охладителей	Потери воды в %
Брызгальные бассейны производительностью в м ³ /ч: До 500	2-3
Более 500	1,5-2
Градирни: Открытые и брызгальные	0,5-1,5
Башенные	0,5-1
Вентиляторные (при наличии водоуловителей)	0,3-0,5

2.6 Модель идеального перемешивания

Для достижения необходимого качества воды в СОВ вводят различные реагенты. При дозировании будем рассматривать упрощенные модели структуры потоков. По режиму движения реакционной среды для нашего случая необходимо рассмотреть модель идеального перемешивания.

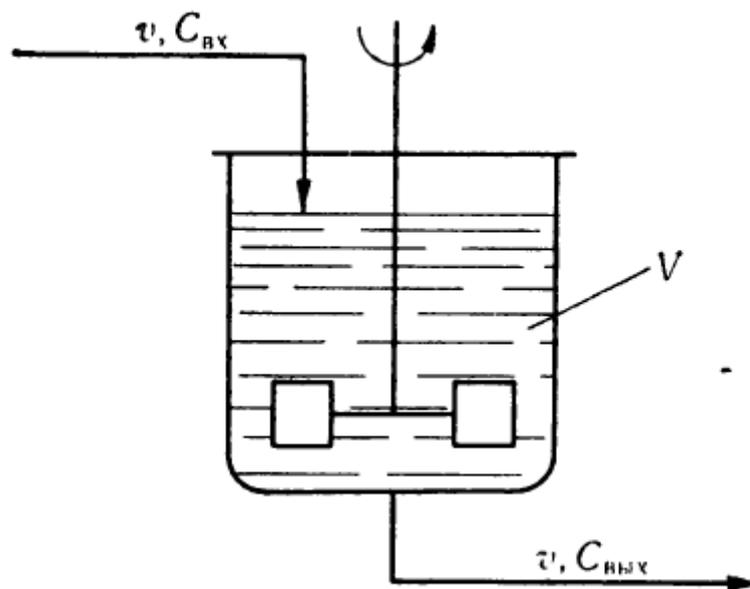


Рисунок 21 - Схема аппарата идеального перемешивания [19]

Рассматривая аппарат идеального смешения, принимаем интенсивность перемешивания в нем настолько большой, что поступающее с потоком вещество мгновенно распространяется по всему объему аппарата и появляется в выходном потоке [42,90]. При этом любое возмущение на входе мгновенно появляется на выходе. Схематическое изображение аппарата на рисунке 21. Используя рисунок 21 можно записать определение модели идеального перемешивания (37) [19]:

$$C_{\text{вх}} \xrightarrow[\text{(мгновенно)}]{\text{скачок}} C = C_{\text{вых}} \quad (37)$$

где $C_{\text{вх}}$, $C_{\text{вых}}$, C – концентрация в потоке на входе, выходе и в любой точке аппарата, моль/м³.

Далее будем использовать следующие обозначения: V - объем зоны идеального перемешивания, м³; v - объемная скорость потока (расход), поступающего в зону идеального перемешивания и выходящего из нее, м³/сек; t –

время, сек; $I_{вх}$, $I_{вых}$, I – поток (количество вещества) на входе, выходе и в любом месте системы, моль/сек.

Необходимо составить дифференциальное уравнение, которое будет описывать распределение концентрации во времени [19].

Для общего случая поток рассматривают как расход, умноженный на концентрацию (38):

$$I = \nu C \quad (38)$$

Для рисунка 21 входной поток вещества будет равен (39), а выходной (40).

$$I_{ex} = \nu C_{ex} \quad (39)$$

$$I_{вых} = \nu C_{вых} \quad (40)$$

Если $C_{ex} = const$, то $I_{ex} = I_{вых}$ и при этом не накапливается масса вещества в аппарате, т.е. в каждый момент времени, сколько приходит столько и уходит вещества из аппарата. Предположим, что в момент времени концентрация на входе увеличилась. Это значит, что нарушается установившийся режим, и равенство потоков не соблюдается, т.е. $I_{ex}(t) \neq I_{вых}(t)$. Накопление вещества в аппарате за время от 0 до t , будет равно (41) [90]:

$$\Delta M = \int_0^t [I_{ex}(t) - I_{вых}(t)] dt \quad (41)$$

Уравнение (41) разделим его обе части на V и подставим значения величин выходного и входного потоков (42):

$$\frac{\Delta M}{V} = \frac{\nu}{V} \int_0^t [C_{ex}(t) - C_{вых}(t)] dt \quad (42)$$

Левая часть равенства (42) – изменение количества вещества к единице объема, т.е. изменение концентрации ΔC (43):

$$\frac{\Delta M}{V} = \Delta C = C(t) - C(0) \quad (43)$$

где $C(t)$ -концентрация в любой момент времени.

Если $C(0) = const$ (значение концентрации до начала возмущения), тогда (44):

$$C(t) - C(0) = \frac{v}{V} \int_0^t [C_{ex}(t) - C_{вых}(t)] dt \quad (44)$$

Продифференцируем уравнение (44) и получим изменение концентрации во времени в рассматриваемом потоке или математическое описание модели идеального перемешивания в дифференциальном виде (45):

$$\frac{dC}{dt} = \frac{v}{V} (C_{ex} - C) \quad (45)$$

Отношение $\frac{v}{V}$ - среднее время пребывания частиц в зоне идеального перемешивания. Обычно называют временем пребывания частиц в аппарате и обозначают τ . τ чаще всего определяют экспериментально или расчетом.

Дифференциальное уравнение модели идеального перемешивания чаще пишут с учетом τ (46):

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{\tau} (C_{ex} - C) \quad (46)$$

Чтобы решить уравнение (46), нужно использовать метод преобразования временной функции $C(t)$ по Лапласу. Используя $C(t) = C_{вых}(t)$ запишем операторное уравнение (47):

$$pC_{вых}(p) = \frac{1}{\tau} [C_{ex}(p) - C_{вых}(p)] \quad (47)$$

Уравнение (47) соответствует (48):

$$W(p) = \frac{C_{вых}(p)}{C_{ex}(p)} = \frac{1}{\tau p + 1} \quad (48)$$

Данное выражение (48) – операторное уравнение модели идеального перемешивания.

Величина $\frac{v}{V}$ имеет смысл постоянной времени объекта T , поэтому (48) можно переписать в виде (49):

$$W(p) = \frac{1}{\tau p + 1} \quad (49)$$

А выражение (49) является передаточной функцией модели идеального перемешивания. Для решения исходного дифференциального уравнения в области действительной переменной t , нужно обратное преобразование по Лапласу. Решение в общем виде (50):

$$C_{\text{вых}}(t) = L^{-1}[W(p)C_{\text{вх}}(p)] \quad (50)$$

Нужная нам функция $C_{\text{вых}}(t)$ может принимать любые значения при различных входных величинах $C_{\text{вх}}(p)$, но чаще всего решения ищут для двух характерных случаев: $C_{\text{вых}}(t) = F_{\text{кр}}(t)$, когда $C_{\text{вх}}(t) = 1(t)$ или $C_{\text{вх}}(p) = \frac{1}{p}$; $C_{\text{вых}}(t) = C_{\text{кр}}(t)$, когда $C_{\text{вх}}(t) = \delta(t)$ или $C_{\text{вх}}(p) = 1$.

Для рассматриваемого объекта, структура потока в котором соответствует модели идеального перемешивания, указанные решения имеют вид:

при ступенчатом стандартном сигнале на входе (51)

$$F_{\text{кр}}(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{\tau p + 1} \cdot \frac{1}{p}\right] = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (51)$$

при импульсном стандартном сигнале на входе (52)

$$C_{\text{кр}}(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{\tau p + 1} \cdot 1\right] = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (52)$$

На рисунке 22 показан график для уравнения (51). График изменения выходной концентрации при воздействии на вход единичного ступенчатого возмущения.

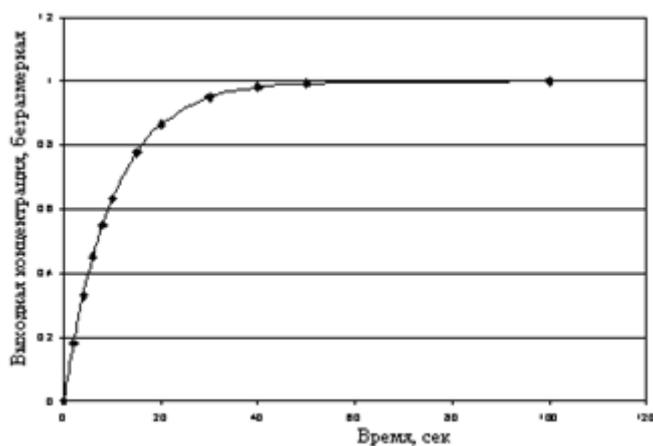


Рисунок 22 - Кривая разгона аппарата идеального перемешивания на ступенчатое единичное возмущение входа [90]

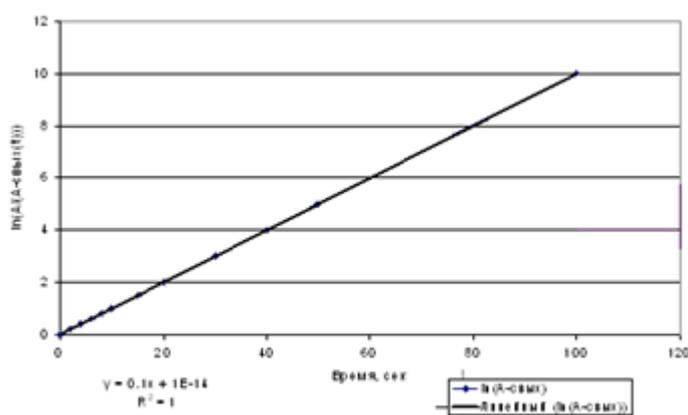


Рисунок 23 - Определение времени пребывания по кривой разгона

На рисунке 23 представлена графическая зависимость для определения среднего времени пребывания по экспериментальной кривой разгона. При этом тангенс угла наклона этой прямой есть величина, обратная времени пребывания [90].

Отклик аппарата идеального перемешивания на импульсное возмущение, подаваемое на вход приведен на рисунке 24 (для уравнения (52)). На нем показано изменение во времени входной концентрации, подаваемой на вход аппарата в виде единичного импульса. На рисунке 25 - зависимость выходной концентрации от времени.

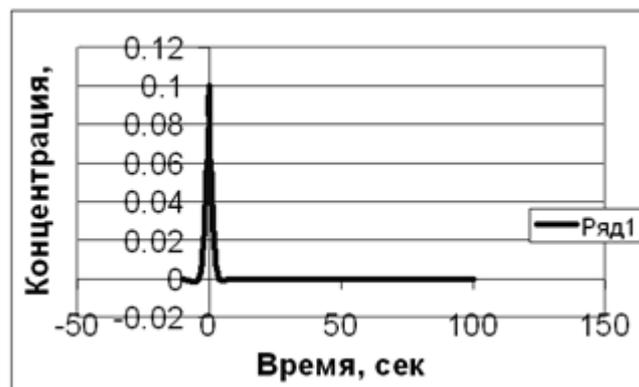


Рисунок 24 - Зависимость входной концентрации от времени [90]

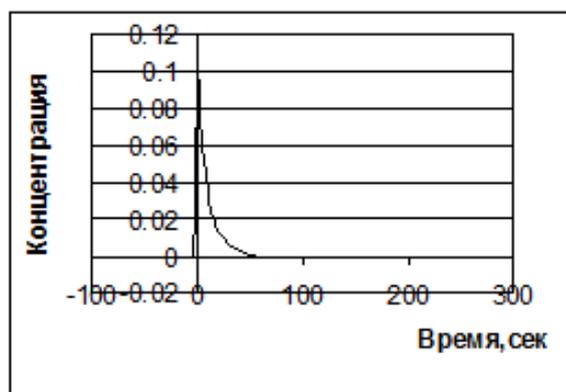


Рисунок 25 - Зависимость выходной концентрации от времени [90]

Таким образом, по характеру изменения выходной концентрации при подаче возмущений на вход аппарата, можно определить тип структуры потока, описывающего перенос массы движущимся потоком жидкости [90].

2.6.1 Математическая модель аппарата идеального перемешивания

Уравнение модели идеального перемешивания представляют математическим выражением, которое характеризует изменение концентрации в реакционной среде во времени [20]. Оно обусловлено движением потока (гидродинамический фактор) и химическим превращением (кинетический фактор). Поэтому модель идеального перемешивания строят на основе типовой модели идеального перемешивания с учетом скорости химической реакции, т.е. записываем изменение концентрации как алгебраическую сумму (53) [19]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{v}{V}(C_{\text{ex}} - C_{\text{вых}}) + \omega_r \quad (53)$$

где ω_r – скорость химической реакции.

Соответственно, количество уравнений будет зависеть от количества веществ. Переменная C будет концентрацией соответствующего i -го вещества (C_a, C_b, \dots) и ω_r – скоростью реакции по тому же i -му веществу. Система указанных уравнений будет математической моделью рассматриваемого реактора идеального перемешивания с учетом изменения C_i во времени (динамическая модель) [19].

Если принять, что исходным является вещество А, и заменить величины $C_{\text{вх}} = C_{A0}$, $C_{\text{вых}} = C_A$, $\omega_r = -\omega_{rA}$ (вещество А убывает), а также представить время пребывания как отношение реакционного объема к объемной скорости $\tau = \frac{V}{v}$, то уравнение (53) примет вид (54):

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{1}{\tau}(C_{A_0} - C_A) - \omega_{rA} \quad (54)$$

При установившемся режиме работы реактора, который характеризуется соблюдением условия $dC/dt = 0$, уравнение (54) можно записать так:

$$\frac{1}{\tau}(C_{A_0} - C_A) = \omega_{rA} \quad (55)$$

откуда

$$\tau = \frac{(C_{A_0} - C_A)}{\omega_{rA}} \quad (56)$$

Уравнение (56) является статической моделью химического реактора идеального перемешивания в общем виде.

Если скорость реакции выразить по образующемуся продукту S, т.е. принять, что $\omega_r = \omega_{rS}$, $C_{\text{ex}} = C_{S0}$, $C = C_S$, и подставить данные величины в уравнение (56) итогом преобразований будет (57):

$$\tau = \frac{C_S - C_{S_0}}{\omega_{rS}} \quad (57)$$

Решая уравнения (56) и (57) можно найти основные параметры, характеризующие работу и экономичность химических реакторов данного типа: время пребывания исходного вещества в реакторе τ , от величины которого зависит объем аппарата (чем меньше τ , тем меньше V); изменение концентрации исходного вещества во времени; а также концентрации целевых и побочных продуктов.

2.7 Выводы по главе 2

В данной главе разработан комплекс теоретических и экспериментальных исследований. Описаны принципы построения моделей, балансы в СОВ, учитывающие потери воды в охлаждающих устройствах, подробно рассмотрена модель идеального перемешивания. Проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке, обработаны результаты исследования, по которым можно сделать вывод о возможности использования датчика электропроводности для осуществления продувки.

В ходе работы над главой 2 были сформулированы следующие научные положения, выносимые на защиту:

1. Модель коррекционной обработки воды системы оборотного водоснабжения, разработанная на основе данных водного баланса системы, позволяет рассчитывать концентрации используемых реагентов и осуществлять прогнозирование объемных расходов для восполнения их потерь и последующую корректировку свойств оборотной воды при разных коэффициентах упаривания.

2. Автоматизированная система управления коррекционной обработки воды, разработанная на основе прогнозирующей модели, обеспечивает постоянную рабочую концентрацию дозируемых реагентов в водообороте, что позволяет существенно сократить количество воды на продувку и увеличить срок службы теплообменного оборудования.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ СОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В результате промышленной деятельности металлургического предприятия в СОВ образуются примеси, характеризующие технологический процесс. В данной главе будут исследованы: технологическая схема СОВ металлургического предприятия, данные лабораторных анализов воды СОВ, проведено моделирование системы коррекционной обработки воды.

Ставится задача проанализировать состав воды СОВ и на основе анализа, разработать технологию для корректировки свойств воды, а также определить значения основных параметров процессов.

Для достижения цели работы, создания автоматизированной системы управления и проведения исследований поведения объекта требуется создание модели. Важно, чтобы модель соответствовала реальному объекту, а также отражала свойства, интересующие исследователя. На разработанной модели провести ряд экспериментов для утверждения выбранной технологии, удовлетворяющей требованиям для получения воды требуемого качества

3.1 Общее описание СОВ охлаждения с градирней

В диссертационной работе объектом моделирования является система для поддержания оптимальных свойств воды СОВ на металлургическом предприятии. Интересующая система применяется в составе СОВ, предназначенной для охлаждения технической воды предприятия. В процессе использования оборотная вода загрязняется, а ее состав насыщается специфическими примесями, соответствующими характеру производственного процесса.

На рисунке 26 представлена принципиальная технологическая схема системы оборотного водоснабжения с градирней. Система охлаждения открытая с испарительным охлаждением воды.

секцию приемной емкости для охлажденной воды. С этой секции емкости охлажденной воды она забирается насосом Н2 и подается на второй контур градирни. Охладившись, вода поступает в другую секцию приемной емкости охлажденной воды. И уже откуда забирается насосом Н3 и подается на охлаждаемое оборудование.

Однако, прежде чем охлажденная вода поступит на оборудование необходимо стабилизировать ее состав. Для этого необходимо разработать систему управления качеством воды СОВ. Техническое решение системы будет описано в дальнейшем.

В системе предусмотрена установка приборов КИП и А: контроля давления, температуры. Для контроля уровня воды в емкостях монтируются датчики уровня. Из емкостей также выводится трубопровод опорожнения воды с отводом в канализацию.

Обязательны в системе узлы подпитки и продувки системы. Для подачи или вывода воды из системы используют электромагнитные клапана. А для учета расхода и количества воды применяют ультразвуковые расходомеры.

3.2 Исходные данные для построения математической модели поддержания свойств воды

Система для поддержания свойств воды в водообороте рассматривается отдельно от общей системы охлаждения, в виде модели. В качестве исходных данных при построении математической модели стабилизационной обработки воды и получения стабильного качества воды в системе применяют значения показаний установленных датчиков, данные лабораторных анализов, данные водного баланса СОВ.

Существует несколько способов для контроля качества воды СОВ металлургических предприятий. Проведение лабораторных анализов воды СОВ по технологическому регламенту, является самым распространённым. Так же, мало распространенные, современные системы контроля используют данные,

получаемые по датчикам концентраций. Необходимо отметить, что данный метод имеют большую погрешность и неточную дозировку реагентов.

Предлагаемый метод корректировки свойств воды основан на математическом методе расчета концентраций по данным водного баланса СОВ.

Анализ оборотной воды исследуемого металлургического предприятия приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Состав воды СОВ металлургического предприятия

№ п/п	Наименование загрязняющих веществ	Исходная вода СОВ
1	Водородный показатель рН	8,2
2	Жесткость общая, мг-экв/л	4,2
3	Кальций, мг/л	60,0
4	Магний, мг/л	18,0
5	Щелочность, мг-экв/л	3,2
6	Железо, мг/л	0,26
7	Калий, мг/л	32,4
8	Марганец, мг/л	1,6
9	Окисляемость, мгО ₂ /л	3,3
10	Взвешенные вещества, мг/л	60,0
14	Сульфаты, мг/л	83,0
15	Сухой остаток, мг/л	460
16	Фториды, мг/л	1,9
17	Хлориды, мг/л	89,0
18	Нефтепродукты, мг/л	0,1

По данным таблицы 14 и с учетом основных проблем качества воды металлургического предприятия были определены 4 дозируемых реагента. В данной системе это: основной биоцид - гипохлорит натрия (реагент d) и шоковый биоцид, (реагент a), ингибитор коррозии (реагент b) и антискалянт (реагент c). Состав и количество реагентов могут быть различны, для каждого конкретного случая обработки воды СОВ.

Для достижения постоянного качества воды необходимо поддерживать рабочие концентрации этих реагентов в определенном технологическом диапазоне:

концентрация реагента a: $c[a] = 0,05$ мг/л;

концентрация реагента b: $c[b] = 0,15$ мг/л;

концентрация реагента с: $c[c] = 0,03$ мг/л;

концентрация реагента d: $c[d] = 0,01$ мг/л.

Концентрации реагентов задаются в виде уставок в программном пакете и могут меняться технологом в зависимости от характера протекания технологического процесса.

Также, в качестве входных параметров нужно задать товарные концентрации дозируемых реагентов, которые определяются их типом, маркой и производителем. Начальные массы дозируемых реагентов для достижения требуемой концентрации в объеме системы.

Для рассматриваемой системы эти массы равны:

масса реагента a: $m[a] = 3000000$ мг = 300 г;

масса реагента b: $m[b] = 900000$ мг = 900 г;

масса реагента с: $m[c] = 180000$ мг = 180 г;

масса реагента d: $m[d] = 600000$ мг = 600 г.

Для работы системы требуются знать значение общего объема системы и расходы всех входящих и выходящих потоков:

общий объем системы: $V_{\text{общ}} = 6000$ м³ = 6000000 л;

расход подпитки: $Q_{\text{под}} = 123000$ л/ч;

расход продувки: $Q_{\text{прод}} = 20000$ л/ч;

расход испарения: $Q_{\text{исп}} = 100000$ л/ч;

расход уноса: $Q_{\text{уноса}} = 3000$ л/ч.

Общий объем воды в системе определяется как разность между общим приходом и общим расходом материальных потоков в системе.

В качестве вектора входных переменных X , состоящего из вектора управляющих воздействий, взяты управляющие воздействия объемов прихода и расхода воды $Q_{\text{исп.}}$, $Q_{\text{уноса}}$, $Q_{\text{прод.}}$, $Q_{\text{под.}}$.

Состояние объекта управления оценивают с помощью вектора выходных переменных Y . К вектору Y относятся концентрации коррекционных реагентов ($c[a]$, $c[b]$, $c[c]$, $c[d]$) в системе и общий объем системы $V_{\text{общ}}$. При этом не будем учитывать температуру воды в системе, т.к. первостепенной задачей является

поддержание постоянных концентраций реагентов, а температура поддерживается работой градирни.

Присутствующие в векторе выходных переменных Y концентрации дозируемых реагентов влияют на свойства воды в СОВ. Практический опыт предприятий металлургической промышленности показывает, что при стабилизационной обработке воды, возможно увеличение коэффициента упаривания в несколько раз.

Входные и выходные переменные для моделирования представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Параметры моделирования

Наименование	Обозначение	Ед. измерения
Общий объем воды	$V_{\text{общ.}}, V$	л
Расход подпитки	$Q_{\text{под.}}, \text{podpitka}$	л/ч
Расход продувки	$Q_{\text{прод.}}, \text{produvka}$	л/ч
Расход испарения	$Q_{\text{исп.}}, \text{isp}$	л/ч
Расход уноса	$Q_{\text{уноса}}, \text{unoc}$	л/ч
Масса реагента а	$m_a, m \text{ reagent a}$	мг
Масса реагента b	$m_b, m \text{ reagent b}$	мг
Масса реагента с	$m_c, m \text{ reagent c}$	мг
Масса реагента d	$m_d, m \text{ reagent d}$	мг
Концентрация реагента а	$c[a], c \text{ reag a}$	мг/л
Концентрация реагента b	$c[b], c \text{ reag b}$	мг/л
Концентрация реагента с	$c[c], c \text{ reag c}$	мг/л
Концентрация реагента d	$c[d], c \text{ reag d}$	мг/л
Корректировка массы реагента а	$m \text{ reag a}$	мг
Корректировка массы реагента b	$m \text{ reag b}$	мг
Корректировка массы реагента с	$m \text{ reag c}$	мг
Корректировка массы реагента d	$m \text{ reag d}$	мг

3.3 Описание структуры математической модели

Для разработки структурной схемы модели коррекционной обработки воды нужно использовать знания, описанные в главе 1 и главе 2. На их основе проанализировав схему оборотного водоснабжения с градирней, лабораторные анализы воды, изучив материальные и солевые балансы системы, а также факторы, влияющие на приход и расход потоков воды в систему можно сформировать структуру математической модели коррекционной обработки воды, реализованную при моделировании в программном продукте.

Входные потоки поступают в систему в виде задания объемов и суммируются в блоке «прихода». По аналогии с потоками прихода, выходные потоки приходят в блок «расхода». Разница между суммой расходов и суммой приходов приходит на интегратор, где необходимо задать начальный объем воды в системе. Таким образом, формируется объем воды в системе (58). Далее общий объем сравнивается с заданным и получается значение ошибки (59), которое суммируется к объему задания подпитки системы. Таким образом, минимизируется ошибка поддержания объема воды в системе.

$$V_{\text{прихода}} + V_{\text{расхода}} = V_{\text{общ}} \quad (58)$$

$$V_{\text{общ}} - V_{\text{задан.}} = \Delta \quad (59)$$

Поддержание заданной концентрации реагентов в системе определяется формулами для расчета концентрации по расчетному значению массы и объема системы. При дозировании реагентов в модели рассматривается процесс идеального перемешивания. Значения параметров массы дозируемых реагентов вводятся в систему, также задается значение концентрации реагентов, которую необходимо поддерживать. Модель позволяет рассчитывать массы стабилизационных реагентов при возмущающих воздействиях.

3.4 Основные требования к качеству воды СОВ

Сложность состава воды СОВ можно оценить из таблицы 14. Анализируя данные лабораторного анализа необходимо выделить показатели, оказывающие

наибольшее воздействие на свойства воды, а также показатели, ведущие к образованию проблем качества воды. Последние можно выявить, сравнивая данные анализа с ПДК указанными в таблицах 16 и 17.

Таблица 16 – Требования к качеству оборотной и добавочной вод систем охлаждения [52]

Показатели качества воды	Оборотная вода	Добавочная вода
Температура охлаждающей воды, °С	25-30	До 25
Запах, баллы	< 3	< 3
Цветность, град	не нормируется	—
Жесткость, мг-экв/л		
• общая	< 7	1-2
• карбонатная	< 3	0,5-0,8
Щелочность, мг-экв/л	2-4	0,5-1,0
Общее солесодержание, мг/л	800-1200	150-250
Окисляемость перманганатная, мг O ₂ /л	< 10	1-5
БПК, мг O ₂ /л	5-10	1-5
ХПК, мг O ₂ /л	< 70	15-30
Содержание, мг/л		
• взвешенных веществ	10-20	2-4 (желат.отсутствие)
• масел и смолообразующих веществ	отсутствие	отсутствие
• хлоридов	150-300	30-70
• сульфатов	350-500	70-120
• фосфора (в пересчете на P ₂ O ₅)	< 5	< 1
• азота (общ.)	< 150	< 30-35
• ПАВ	отсутствие	отсутствие
• ионов тяжелых металлов	отсутствие	отсутствие
• растворенного кислорода	6-8	—
• остаточного активного хлора	1	1
рН	6,5-8,5	6,5-8,5

Таблица 17 – Примерные требования к качеству оборотной воды при использовании поверхностных и подземных источников [47,48]

Показатели	Единица измерения	Вода I категории, используемая для охлаждения оборудования и технологических продуктов в теплообменных аппаратах (через стенку)		Вода, используемая в качестве транспортирующей, поглощающей, экстрагирующей и другой среды	
		охлаждение без огневого нагрева поверхностей теплообмена	охлаждение с огневым нагревом поверхностей теплообмена ¹	II категории, без нагрева (обогащение ископаемых, гидрозолоудаление и др.)	III категории, с нагревом (улавливание и очистка газов, гашение кокса и др.)
Температура	°С	Определяется в зависимости от технологического процесса.			
Взвешенные вещества ²	мг/л	До 50	До 20	При гравитации до 10 000 при флотации до 200 Не нормируется	
Эфирорастворимые	»	» 20	» 10	До 3	
Запах	балл	» 3	» 3	До 4	
pH	—	6,5—8,5	6,5—8,5	Не нормируется	6,5—9
Жесткость:					
общая	мг-экв/л	50	—	—	—
карбонатная	»	До 3,5	До 2,5	Не нормируется	При очистке газов необходима обработка оборотной воды
Щелочность общая	»	Не более 4	Не более 3	То же	Необходима обработка воды
Общее солесодержание ³	мг/л	До 2000	До 800	»	Не нормируется
Cl ⁻	»	» 350	» 150	»	То же
SO ₄ ²⁻	»	» 500	» 250	»	»
Fe _{общ} *	»	1—4	0,5—1	»	»
Окисляемость перманганатная	мгО/л	До 20	До 20	При гравитации не нормируется, при флотации 10	»
ХПК	»	» 200	—	Не нормируется	»
БПК ₅	мгО ₂ /л	15—20	—	То же	»
Биогенные элементы в добавочной воде:					
азот общий	мг/л	150	150	Не нормируется	
фосфор (в пересчете на P ₂ O ₅)	»	5	—	То же	

В соответствии с таблицами 14, 16 и 17 можно выявить основные проблемы качества воды.

3.4.1 Индексы стабильности воды

На сегодняшний день существуют различные методы контроля качества оборотной воды. Стабильность состава воды – один из основных показателей ее

качества [48]. Попытки прогнозировать свойства воды по данным о ее составе предпринимались уже давно. Наиболее известным и хорошо разработанным методом оценки коррозионно-накипных свойств воды является метод Ланжелье.

Этот метод качественной оценки свойств воды разработан химиком Ланжелье еще в 30-е годы XX столетия. По данным химического анализа вычисляется индекс Ланжелье (ИЛ), величина которого позволяет оценить способность воды вызывать коррозию стали, или склонность к накипеобразованию. За последние 70 лет неоднократно делались попытки улучшить, усовершенствовать, упростить вычисление индекса Ланжелье. Но, тем не менее, в основе множества разработанных на сегодняшний день методов оценки свойств воды лежит все-таки индекс Ланжелье.

Ланжелье предложил рассматривать индекс (цифровой показатель) свойств воды как:

$$IL_{ng} = pH_0 - pH_s \quad (60)$$

pH_0 —водородный показатель, измеренный с помощью рН-метра;

pH_s —водородный показатель в условиях насыщения воды карбонатом кальция.

Если $IL_{ng} < 0$, т.е. отрицательная величина, то такая вода вызывает коррозию стали. Если $IL_{ng} = 0$, такая вода нейтральна, стабильна. Она не вызывает ни коррозии, ни накипеобразования. Поскольку индекс Ланжелье— характеристика скорее качественная, чем количественная, не следует слишком буквально воспринимать равенство нулю.

Значения индекса Ланжелье в пределах $[-0,3; +0,3]$ надо воспринимать как «ноль». Если $IL_{ng} > 0$, т.е. положительная величина, то такая вода склонна вызывать накипеобразование на поверхности трубопроводов, теплообменников, оборудования. Знак и величина ИЛ характеризуют коррозионно-накипные свойства воды.

Для вычисления индекса Ланжелье по уравнению (60) надо знать pH_0 — величину, измеряемую с помощью рН-метра. Сложнее дело обстоит с вычислением pH_s [38].

Один из способов вычисления pH_s по формуле (61):

$$pH_s = f_1(t) - f_2[Ca^{2+}] - f_3[Щ] + f_4(M) \quad (61)$$

$f_1(t)$ — функция температуры воды;

$f_2[Ca^{2+}]$ — функция содержания в воде катиона кальция;

$f_3[Щ]$ — функция щелочности воды;

$f_4(M)$ — функция общего содержания солей.

Для практического использования составлен график (рис. 4). Слева от каждой прямой графика откладывают числовые значения соответствующих показателей качества воды по данным ее анализа, а справа от прямых находят значения функций этих величин.

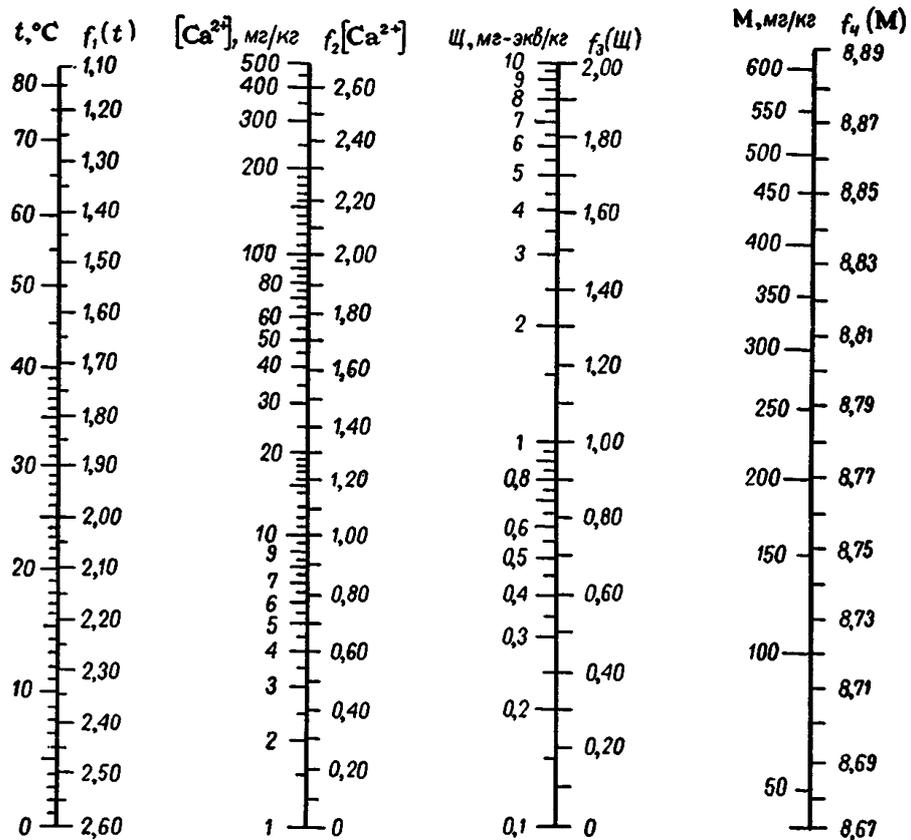


Рисунок 27 — График для определения pH_s по формуле (61)

Следующий метод оценки коррозионно-накипных свойств воды — индекс стабильности Ризнара (ИСП). Также как и индекс Ланжелье, ИСП основывается на учете концентрации растворенного вещества. Ризнар предлагает определять соотношение между растворимостью карбоната кальция и образованием накипи. Индекс Ризнара рассчитывается по уравнению:

$$ИСП = 2 \times (pH_s) - pH_0 \quad (62)$$

Выводы из оценки ИСП по уравнению (62):

- ИСП < 6 — вода склонна к образованию отложений. Эта склонность возрастает по мере уменьшения значения ИСП;
- ИСП > 7 — карбонат кальция откладывается, но поверхность стали от коррозии не защищает;
- ИСП > 8 — с ростом величины ИСП пропорционально возрастает интенсивность коррозии [4].

Индекс Ларсона-Скольда (ИЛС) характеризует коррозионную способность воды по отношению к низкоуглеродистой стали и стальным образцам.

Индекс Ларсона-Скольда представляет собой отношение суммы эквивалентных концентраций хлорионов (Cl^-) и сульфат-ионов (SO_4^{2-}) к сумме эквивалентных концентраций гидрокарбонат-ионов и карбонат-ионов:

$$ИЛС = (C_{Cl^-} + C_{SO_4^{2-}}) / (C_{HCO_3^{2-}} + C_{CO_3^{2-}}) \quad (63)$$

ИЛС устанавливает причинную взаимосвязь между обычными скоростями коррозии и резкими повышениями ее скорости.

ИЛС — испытанный полезный инструмент в предсказании коррозионной агрессивности охлаждающей воды в водооборотных циклах. Особый интерес ИЛС представляет в случае применения ингибиторов коррозии, механизм действия которых основан на использовании естественной щелочности и пленкообразующей способности охлаждающей воды. ИЛС интерпретируется следующим образом способом:

- ИЛС < 0,8 — хлориды и сульфаты не влияют на естественное образование защитной пленки;

- $0,8 < \text{ИЛС} < 1,2$ — хлориды и сульфаты затрудняют образование защитной пленки. Наблюдается более высокая, в сравнении с нормальной, скорость коррозии стали;

- $\text{ИЛС} > 1,2$ — высокая скорость точечной коррозии по мере повышения значения индекса [38].

Для достижения стабильности воды и требуемого качества применяют системы управления. Под управлением качеством оборотной воды подразумевается автоматизация процессов коррекционной обработки и продувки СОВ, позволяющих решить проблему поддержания оптимального режима работы теплообменного оборудования металлургического производства. Система управления решает основные проблемы СОВ - накипь, коррозия, отложения и биологическое обрастание [49].

3.5 Среда моделирования MATLAB

В работе моделирование выполнено в пакете MATLAB при использовании инструмента визуального моделирования Simulink. MATLAB предоставляет в распоряжение пользователя практически универсальный язык объектно-ориентированного программирования в сочетании с интерактивными средствами отладки создаваемых программ [17].

Simulink выполняет моделирование поэтапно. Сначала протекает стадия инициализации. В этой стадии, Simulink включает библиотечные блоки в модель, размножает размеры, типы данных, и определяет время сэмпирования, оценивает блочные параметры, определяет блочный порядок выполнения, и распределяет память. Затем Simulink переходит к циклу моделирования, где каждый проход через цикл, называется шагом моделирования. В течение каждого шага моделирования, Simulink выполняет каждый из блоков модели в порядке, определенном в течение инициализации. Для каждого блока, Simulink вызывает Callback функции модели, которые вычисляют состояния блока, производные, и выходы для текущего времени сэмпирования. Это продолжается, пока моделирование не закончено [54,55].

3.6 Моделирование в программном пакете MATLAB

Моделирование системы было проведено в среде MATLAB (Simulink) на основе исходных данных, описанных ранее.

Модель, созданная в программном пакете MATLAB (Simulink), представлена на рисунке 29.

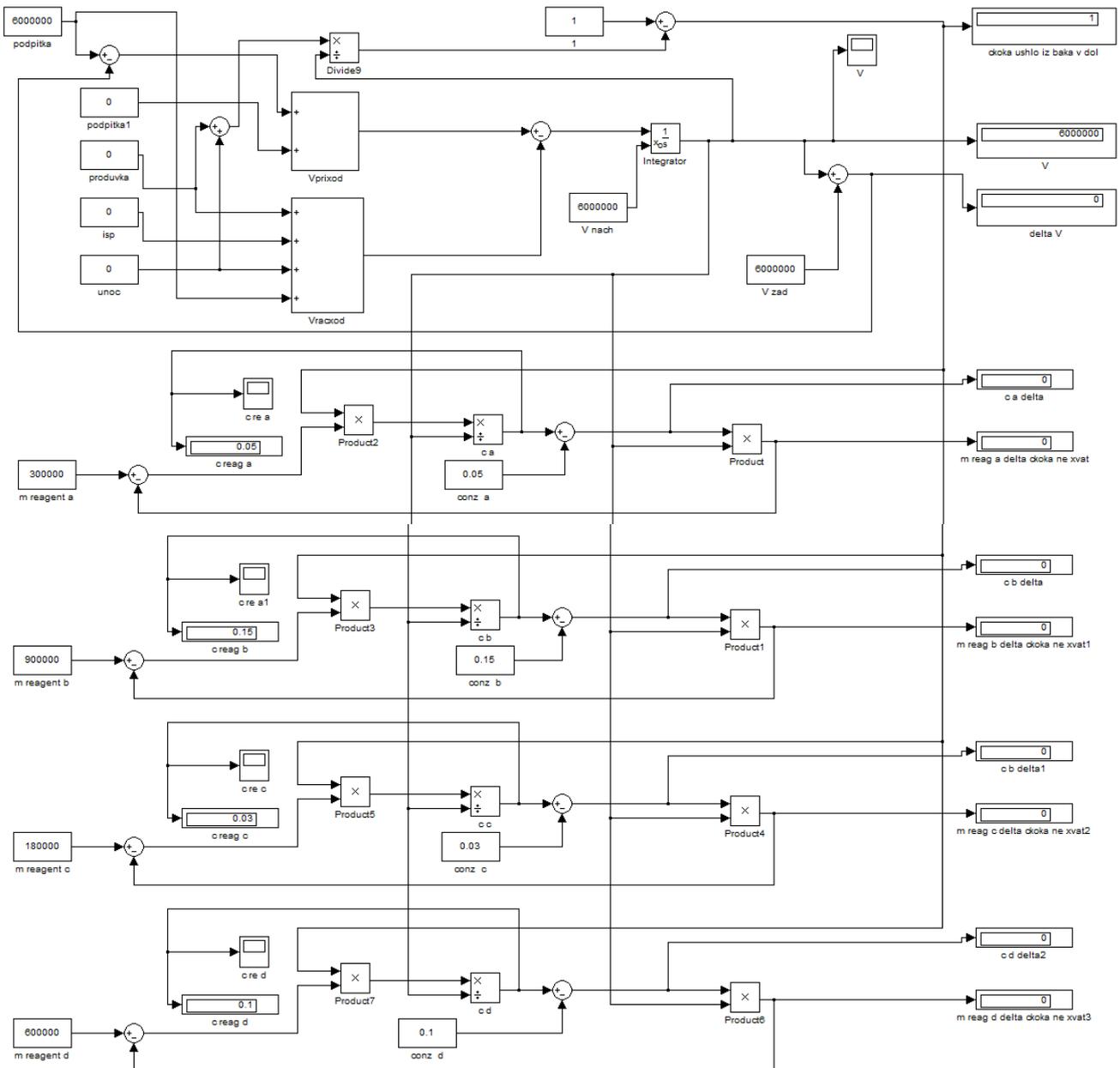


Рисунок 29– Модель системы поддержания качества воды COB в MATLAB (Simulink)

Модель, представленная на рисунке 29, построена с учетом материального и солевого баланса системы, учитывая модели идеального перемешивания при

дозировании реагентов в систему. При работе системы часть воды теряется с уносом – $Q_{ун}$, испарением – $Q_{исп}$, продувкой – $Q_{пр}$, компенсируя сумму потерь добавочной водой – $Q_{подп}$. При сходимости баланса системы можно говорить об адекватности модели и моделирования. Величина продувки $Q_{пр}$ находится из солевого баланса оборотной воды. Количество добавляемой воды составляет примерно 5-10% от общего количества потребляемой воды на производстве.

Данная модель построена на зависимости концентрации дозируемых реагентов от входных и выходных потоков, позволяющая осуществлять прогнозирование объемных расходов этих реагентов и последующую корректировку свойств воды.

Для проверки работоспособности модели необходимо провести ряд экспериментов. Для начала запустим модель с исходными данными. На рисунках 30 и 31 представлены результаты работы системы в виде графиков объема воды в СОВ по отношению к времени процесса и концентраций реагентов a,b,c,d к времени процесса.

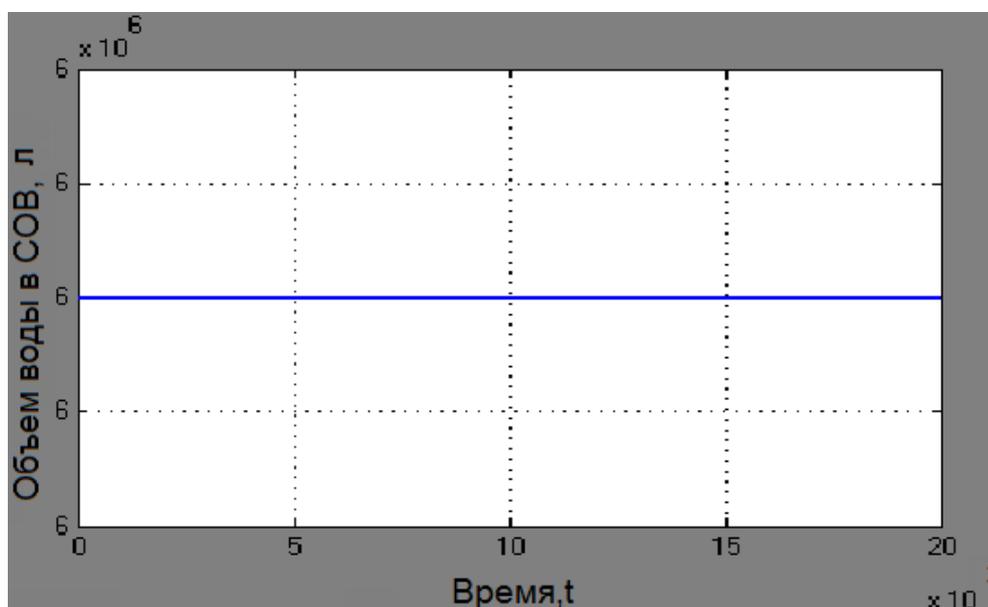


Рисунок 30 – Результат работы модели. Объем воды в СОВ по отношению к времени процесса

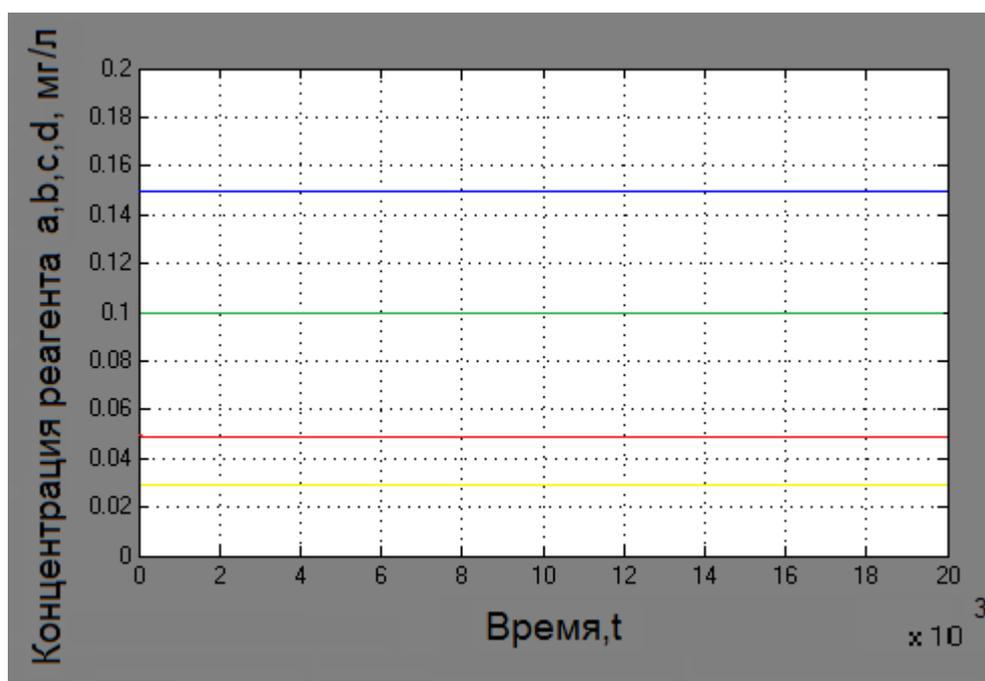


Рисунок 31 – Результат работы модели. Концентрации дозируемых реагентов по отношению к времени процесса

Из представленных графиков на рисунках 30 и 31 видно, что объем воды в системе и концентрации реагентов постоянно, а значит достигается требуемое условие работы. Следует отметить, что в этот момент в системе находится постоянный рабочий объем воды $V=6000 \text{ м}^3$, и начальные рассчитанные массы реагентов a, b, c, d для достижения требуемых значений концентраций этих реагентов.

Промоделируем ситуацию в тот момент времени, когда происходит испарение воды в системе. Предположим, что испарение $Q_{\text{исп}}=100000 \text{ л/ч}$. Запустим модель и посмотрим отклик системы на возмущение. В данном случае возмущением является процесс испарения воды, ввиду которого изменяется объем воды в СОВ.

Результаты работы в этом случае представлены на рисунках 32-36. Из представленных графиков видно, что объем воды в системе при испарении уменьшается, а концентрации реагентов увеличиваются. Ввиду этого можно сделать вывод, что при процессе испарения модель системы работает правильно.

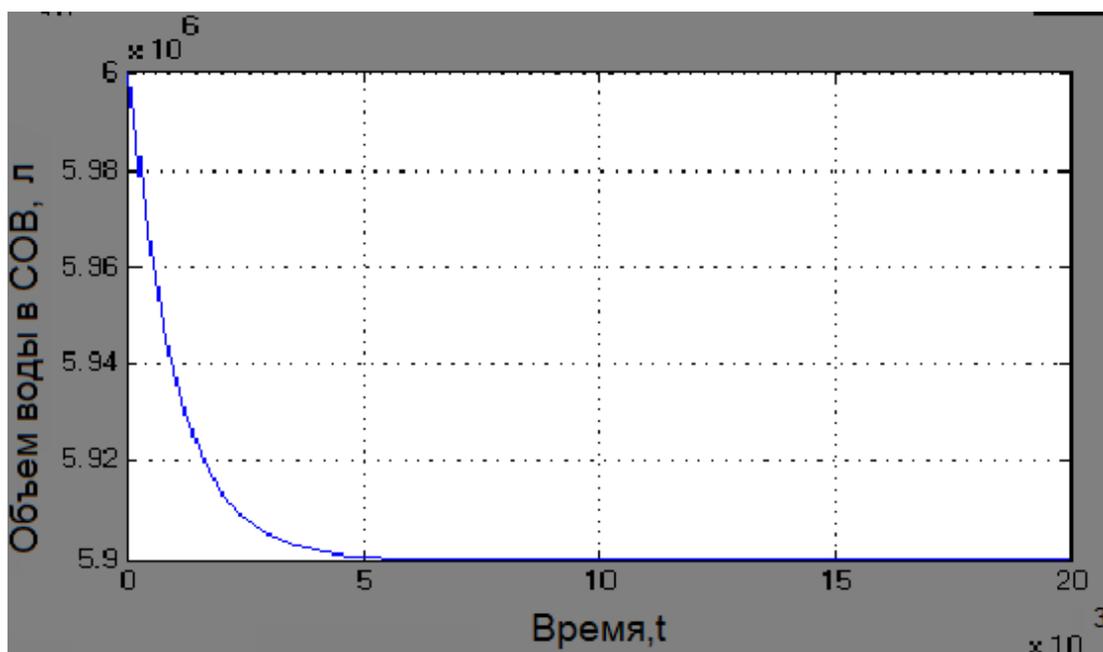


Рисунок 32– Результат работы модели. Объем воды в СОВ по отношению к времени процесса при испарении

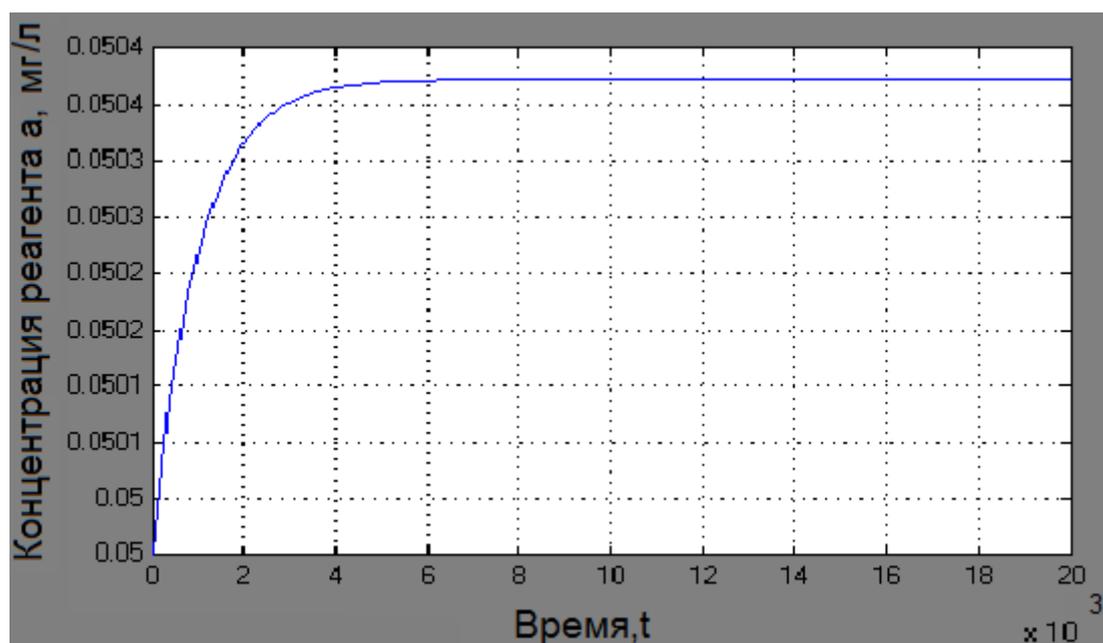


Рисунок 33 – Результат работы модели. Изменение концентрации дозируемого реагента а по отношению к времени процесса при испарении

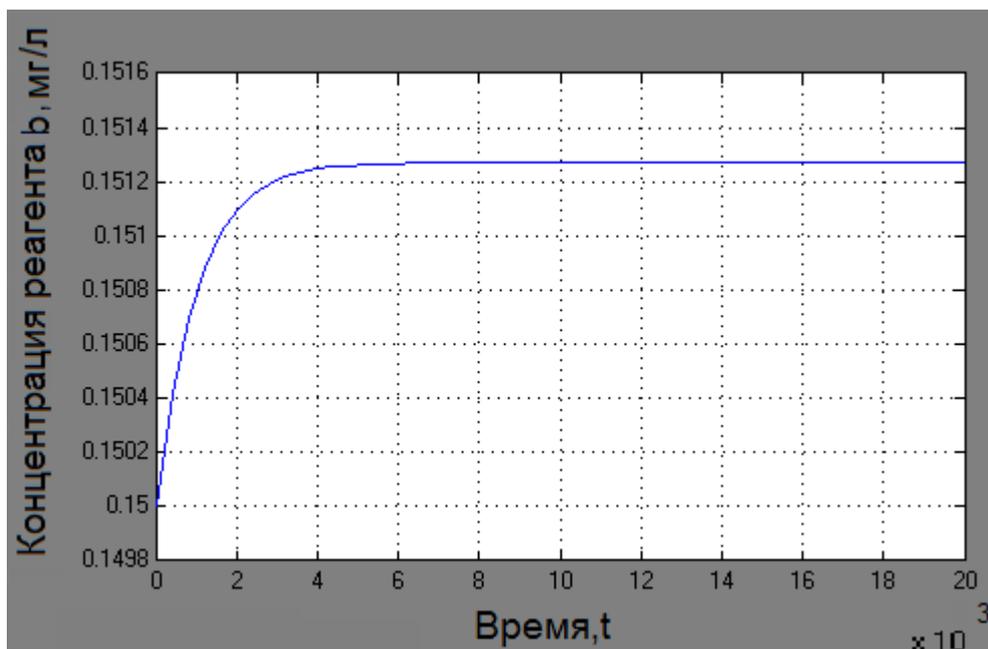


Рисунок 34 – Результат работы модели. Изменение концентрации дозируемого реагента b по отношению к времени процесса при испарении

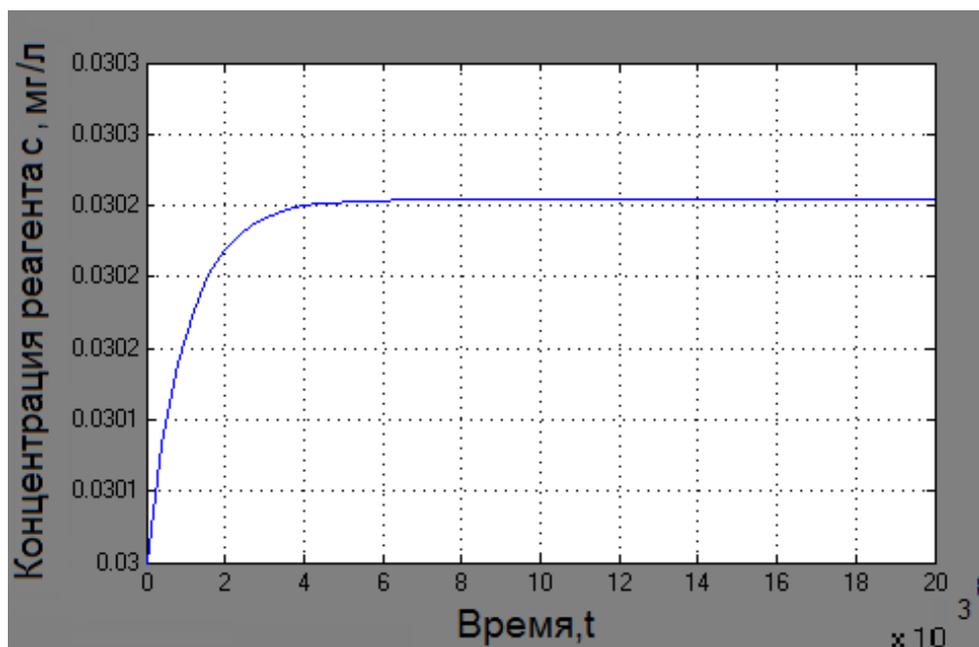


Рисунок 35 – Результат работы модели. Изменение концентрации дозируемого реагента c по отношению к времени процесса при испарении

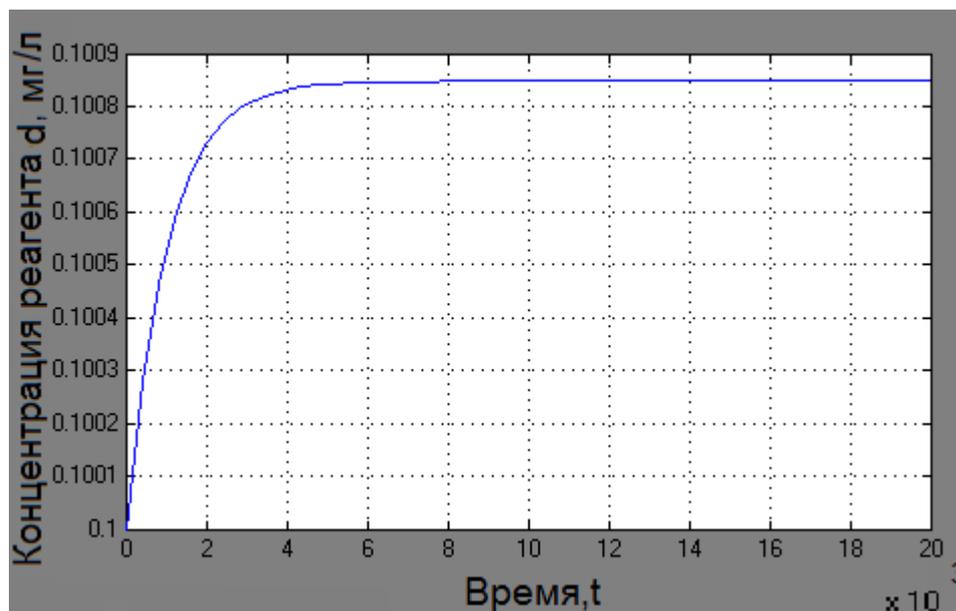


Рисунок 36 – Результат работы модели. Изменение концентрации дозируемого реагента d по отношению к времени процесса при испарении

Следующим параметром в качестве возмущающего воздействия была задана продувка системы $Q_{\text{прод}}=20000$ л/ч. Результаты работы модели в этом случае представлены на графиках 37,38.

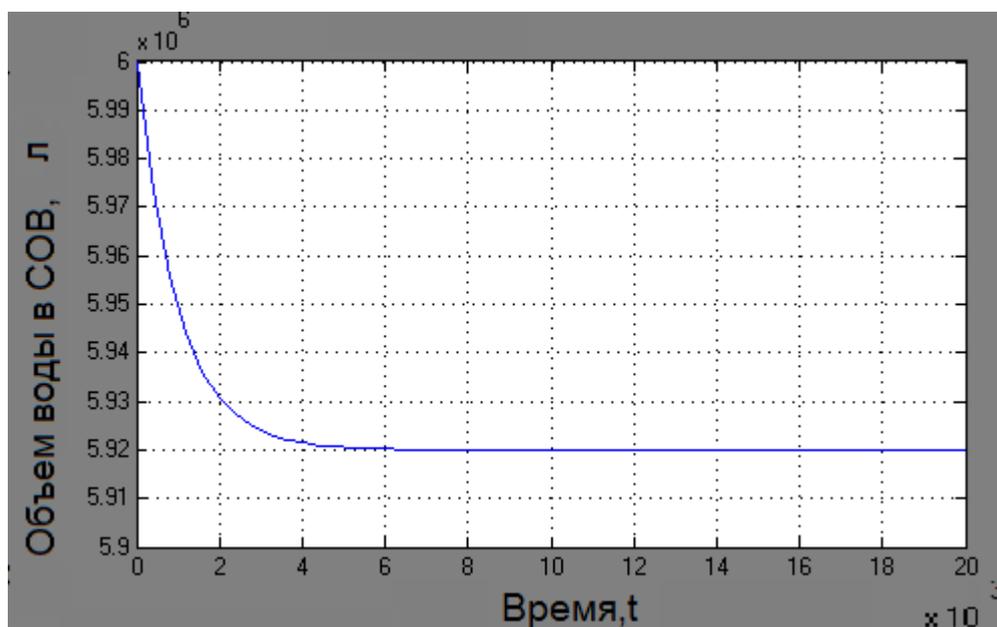


Рисунок 37– Результат работы модели. Объем воды в СОВ по отношению к времени процесса при продувке

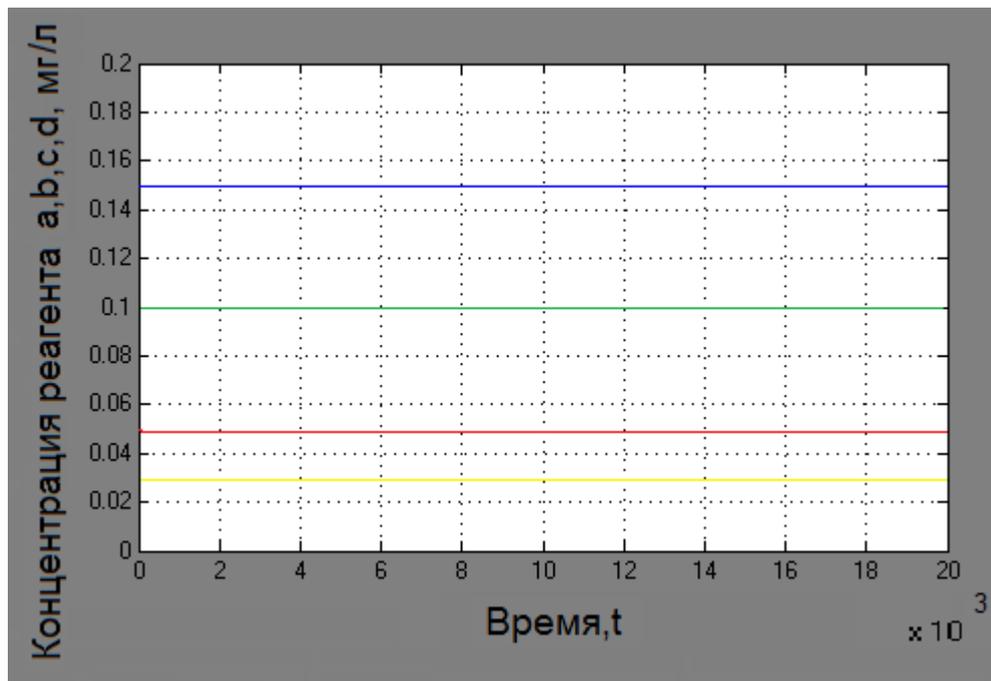


Рисунок 38 – Результат работы модели. Концентрации дозируемых реагентов по отношению к времени процесса при продувке

Исходя из данных графиков на рисунках 37,38, видно, что при продувке системы общий объем уменьшается, а концентрации реагентов не меняются. Это происходит потому, что при продувке системы концентрация реагентов не меняется, а просто уносится с частью объема.

Далее в качестве возмущающего воздействия был задан унос воды из системы $Q_{\text{унос}}=3000$ л/ч.

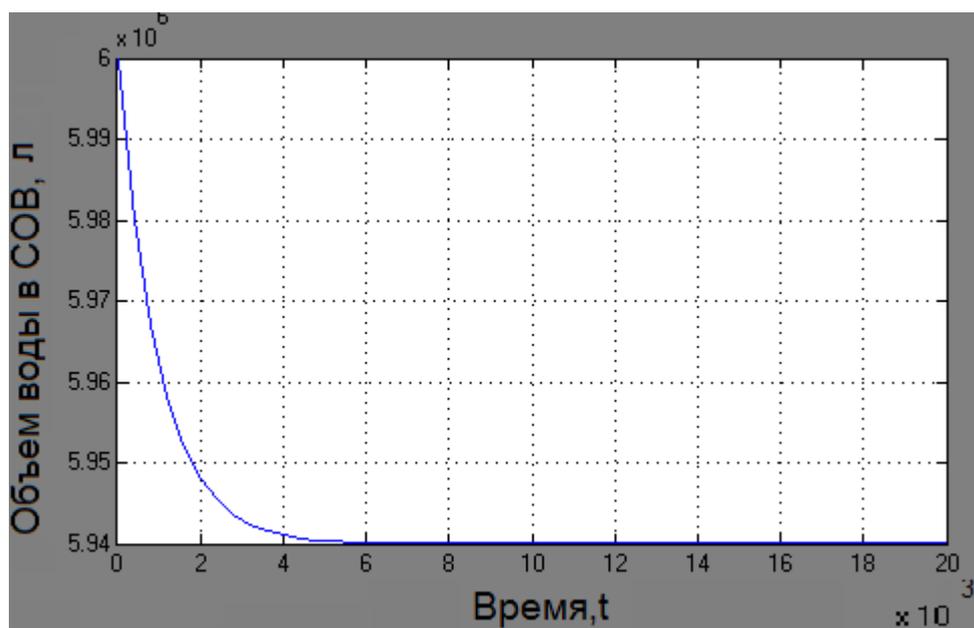


Рисунок 39 – Результат работы модели. Объем воды в СОВ по отношению к времени процесса при уносе воды из системы

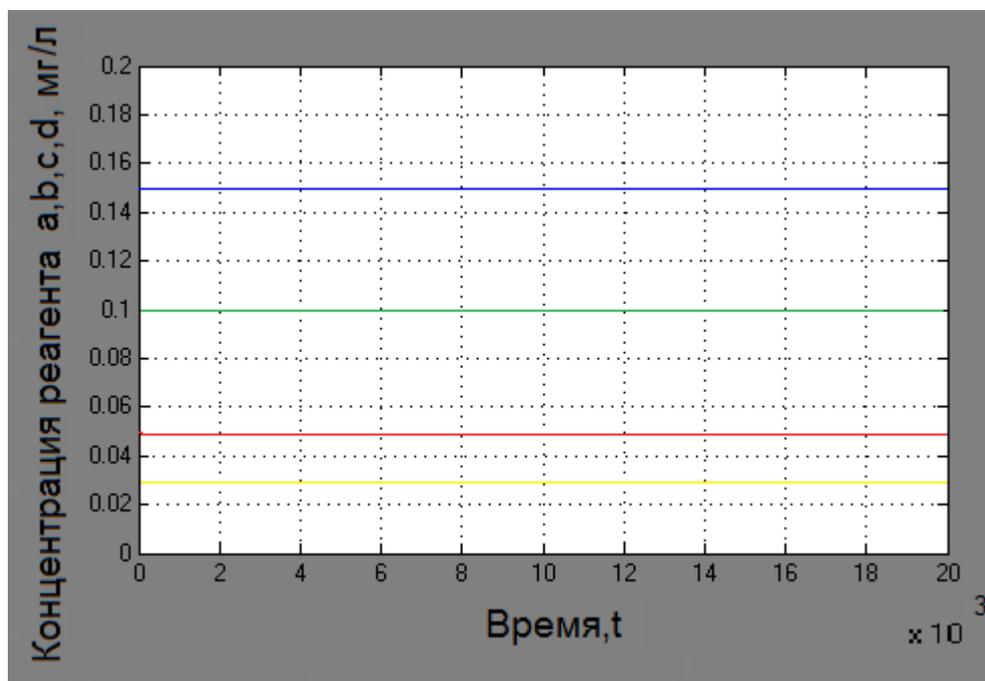


Рисунок 40 – Результат работы модели. Концентрации дозируемых реагентов по отношению к времени процесса при продувке

Результаты работы модели при уносе воды из системы представлены на графиках рисунков 39,40 позволяют сделать вывод, что физический смысл уноса воды из системы такой же, как и при продувке системы. Наблюдается сохранение концентрации реагентов в системе при уменьшении объема воды.

Заключительным возмущающим воздействием задавалась подпитка системы $Q_{\text{подп}}=123000$ л/ч.

Результаты работы в этом случае представлены на рисунках 41-45. Из представленных графиков видно, что объем воды в системе при подпитке возрастает, а концентрации реагентов уменьшаются. Ввиду этого можно сделать вывод, что при подпитке системы модель системы работает правильно.

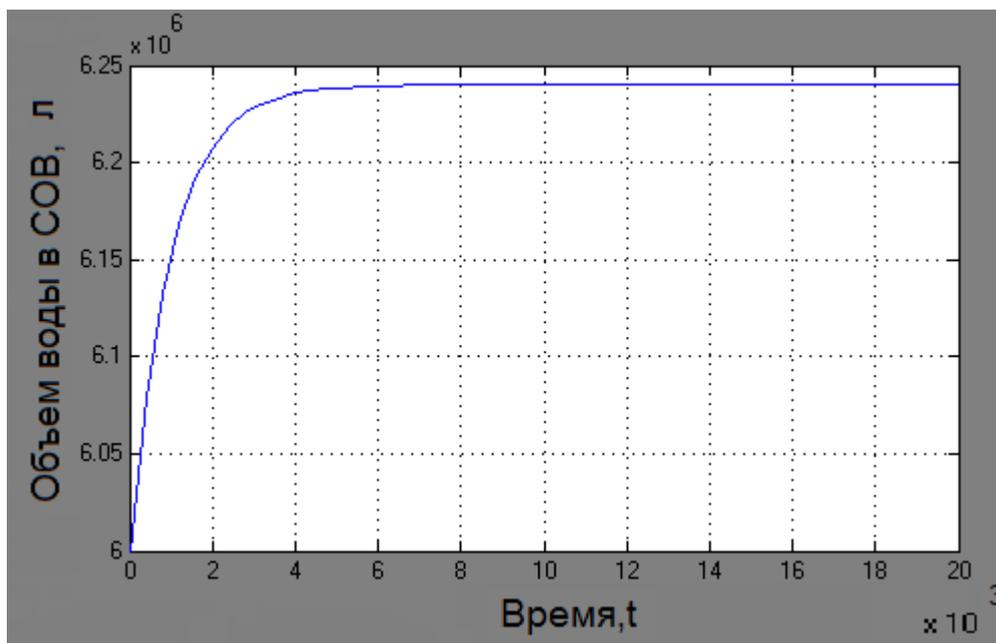


Рисунок 41– Результат работы модели. Объем воды в СОВ по отношению к времени процесса при подпитке

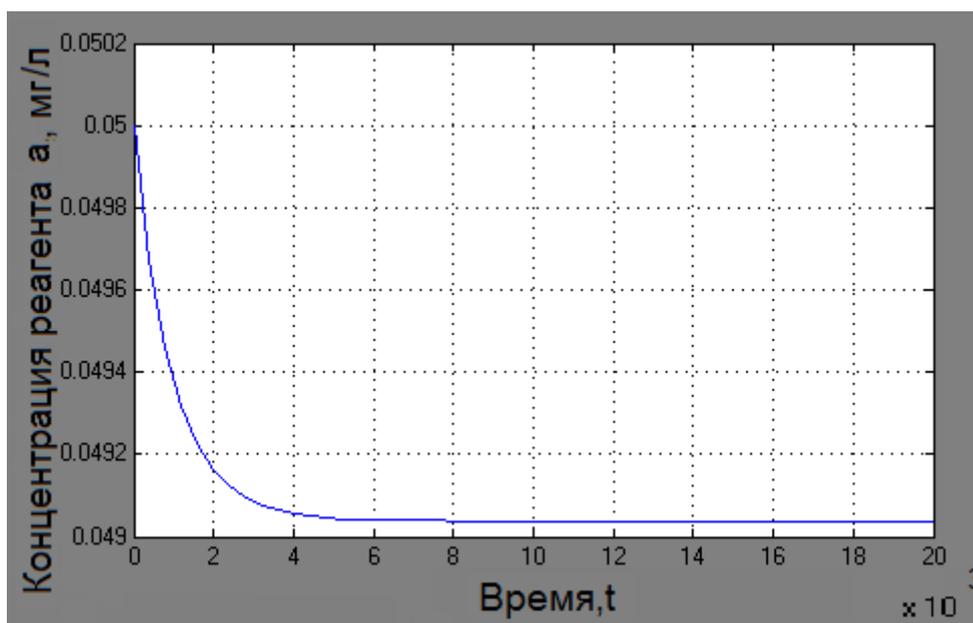


Рисунок 42 – Результат работы модели. Изменение концентрации дозируемого реагента a по отношению к времени процесса при подпитке

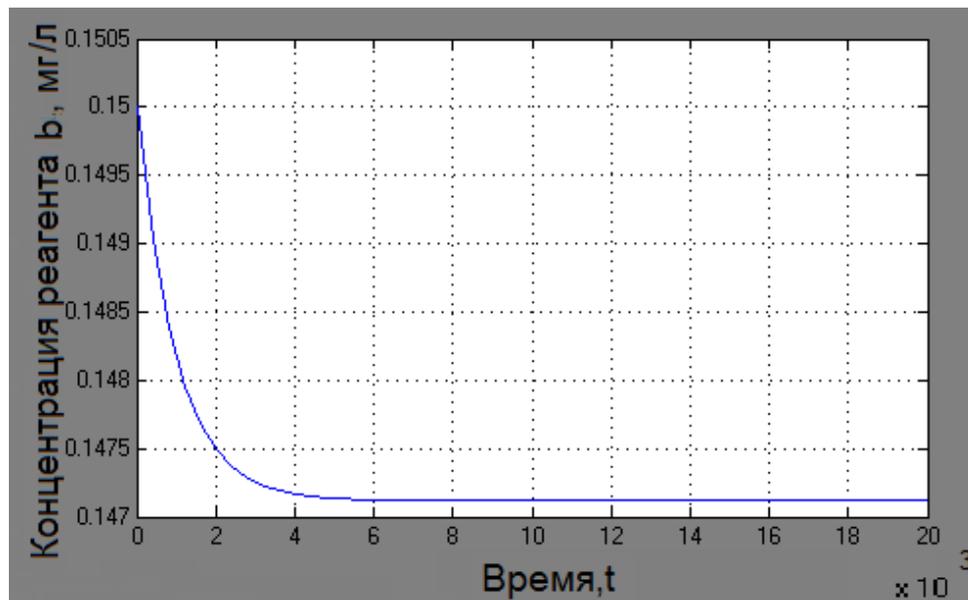


Рисунок 43 – Результат работы модели. Изменение концентрации дозируемого реагента b по отношению к времени процесса при подпитке

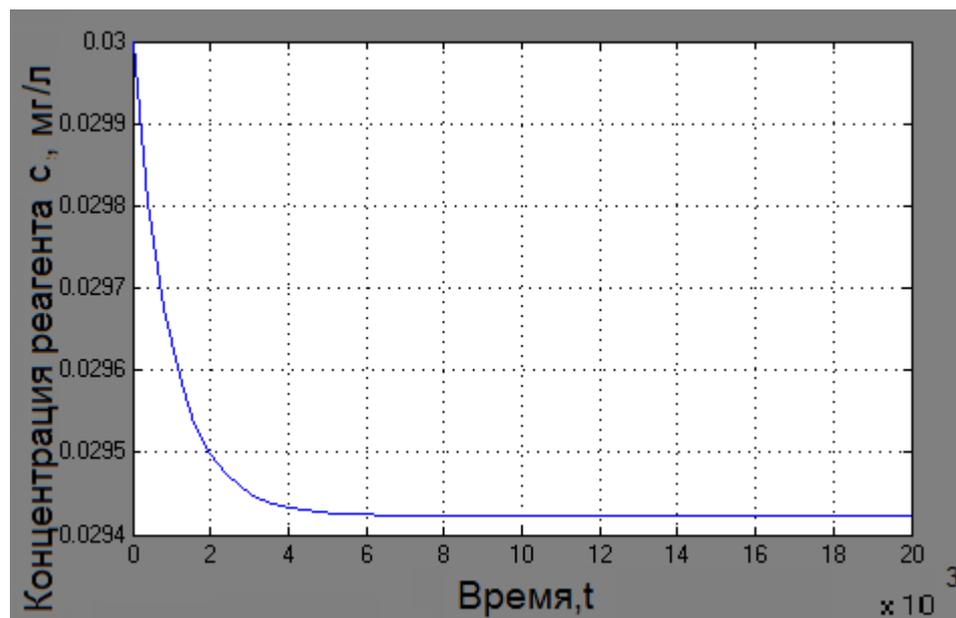


Рисунок 44 – Результат работы модели. Изменение концентрации дозируемого реагента c по отношению к времени процесса при подпитке

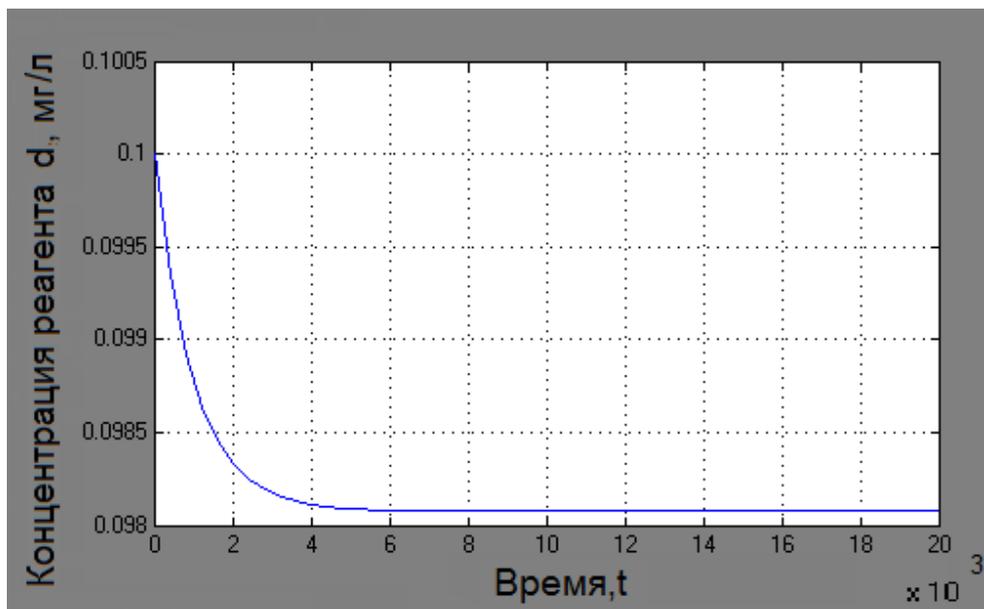


Рисунок 45 – Результат работы модели. Изменение концентрации дозируемого реагента d по отношению к времени процесса при подпитке

3.7 Выводы по главе 3

В данной главе была описана технологическая схема СОВ металлургического предприятия, изучены данные лабораторных анализов воды СОВ, разработана модель системы коррекционной обработки воды.

Модель системы оборотного водоснабжения, основанная на разделении принципов поддержания концентрации дозируемых реагентов, позволяет определять значения концентраций стабилизационных реагентов от входных и выходных потоков, осуществлять корректировку объемных расходов реагентов и прогнозирование свойств оборотной воды в разных эксплуатационных режимах.

На построенной модели были проведены исследования с возмущающими потоками подпитки, продувки, уноса и испарения. На модели можно моделировать различные ситуации, исходя из различных значений параметров возмущающих воздействий. Математический расчет концентраций по данным водного баланса позволяет узнавать значения концентраций реагентов в любой момент времени и учитывать факторы, влияющие на водный баланс СОВ.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ВОДЫ СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА

В главе 3 было приведено моделирование по разработанному технологическому решению коррекционной обработки воды СОВ на основе расчета концентраций различных реагентов по данным водного баланса СОВ. На основе предложенного решения была создана модель и проведены исследования, подтверждающие правильность результатов моделирования и адекватность модели. Разработанная модель легла в основу автоматизированной системы управления качеством воды СОВ металлургического предприятия. Основная цель внедрения АСУ ТП - это повышение экономической эффективности предприятия. Её достижение возможно только при грамотном проведении всего комплекса работ в области создания интегрированных систем комплексной автоматизации, построенных на базе современных технологических разработок и методик, технических, программных и коммуникационных средств и технологий.

Управление процессом коррекционной обработки воды СОВ заключается в стабилизации выходных и входных потоков (параметров) относительно требуемых. В каждой системе эти параметры свои, а в нашей, это поддержание концентраций необходимых реагентов в зависимости от постоянно изменяющегося солевого баланса в СОВ. В большинстве случаев, сложность обусловлена отсутствием постоянного автоматического контроля, а дозирование осуществляется косвенно на основе сигналов с датчиков, но для этого должны быть четкая зависимость [11]. Бывает даже, что управление процессом осуществляется на основе данных лабораторного анализа несколько раз за смену. Такие временные задержки могут существенно сказаться на процессе.

4.1. Обзор существующих автоматизированных систем дозирования

В последнее время все чаще стали появляться различные автоматизированные системы для поддержания физико-химических свойств воды в системах оборотного водоснабжения [31-34, 49].

При обработке воды хлором с целью ее обесцвечивания или борьбы с биологическими отложениями, когда оптимальная доза хлора устанавливается по опытным данным, системы управления хлораторами строятся также по схемам стабилизации с коррекцией дозы хлора по концентрации остаточного хлора [21].

Большие успехи в области САУ качества воды имеет компания Nalco, входящая в состав корпорации Ecolab. Разработанная ими технология 3D TRASAR для охлаждающей воды включает в себя уникальный мониторинг в режиме реального времени, борьбу с загрязнением с использованием запатентованных активных веществ, запатентованный стрессоустойчивый химический состав и информационные службы, работающие в режиме 24/7, для обнаружения, определения и обеспечения эффективной борьбы с накипью и коррозией, а также микробиологического контроля систем охлаждения [49].

Таким образом, система 3D TRASAR обнаруживает неполадки, предшествующие образованию накипи, коррозии и биозагрязнений, а затем обеспечивает соответствующее химическое реагирование [49].

Данная технология очень привлекательна для современных металлургических предприятий, но имеет существенный недостаток - стоимость.

Известна программа расчета обработки ОВ для предотвращения карбонатных и сульфатных отложений в СОВ «Обработка охлаждающей воды», разработанная в Московском энергетическом институте [35].

Программа «Обработка охлаждающей воды» выполнена в среде Mathcad и перенесена в Интернет по технологии Mathcad Application Server. В сетевой программе исходные данные вводятся в поля ввода веб-формы. После ввода исходных данных веб-форма отправляет данные на сервер. На сервере программа MAS выполняет расчет и отправляет результаты обратно [36].

Пример окна для ввода исходных данных программы «Обработка охлаждающей воды» показан на рисунке 46 [37].

Исходные данные:Состав добавочной воды, мг/дм³

$Na_{доб} :=$ <input type="text" value="29.44"/>	$Cl_{доб} :=$ <input type="text" value="45"/>	
$Ca_{доб} :=$ <input type="text" value="60"/>	$SO_{4доб} :=$ <input type="text" value="34"/>	
$Mg_{доб} :=$ <input type="text" value="15.6"/>	$HCO_{3доб} :=$ <input type="text" value="219.6"/>	$pH :=$ <input type="text" value="7.2"/>

Окисляемость, мг O₂/дм³ $Ok :=$ Расход циркуляционной системы, м³/ч $Q :=$ Если необходимо рассчитать расход циркуляционной системы и потерь воды, перейдите по ссылке [>>>](#)

Потери воды, в % от расхода циркуляционной воды:

На испарение	$p_1 :=$ <input type="text" value="1.4"/>	Унос брызг	$p_2 :=$ <input type="text" value="0.1"/>
Продувка	$p_3 :=$ <input type="text" value="1.5"/>	Прочие	$p_4 :=$ <input type="text" value="0"/>

Температура циркуляционной воды перед охладителем, °C $t_1 :=$ Температура охлажденной воды, °C $t_2 :=$

Рисунок 46 – Окно программы «Обработка охлаждающей воды»

Существующие системы имеют большие преимущества, но имеют и ряд минусов.

4.2. Структура АСУ ТП

Первые три уровня управления называют АСУТП – автоматизированные системы управления технологическими процессами (рисунок 47).

1-ый уровень (уровень оборудования) – непосредственно то, чем управляют. На этом уровне расположены датчики, измерительные устройства, исполнительные механизмы и т.д.

2-ой уровень (уровень управления) – логические контроллеры и системы управления на основе промышленных компьютеров

3-ий уровень («человеко-машинный интерфейс») – системы SCADA и DCS. Автоматизированные системы, осуществляющие управление посредством человеко-машинного интерфейса.

Выше идут уровни управления производственными процессами и финансово-хозяйственной деятельностью предприятия.

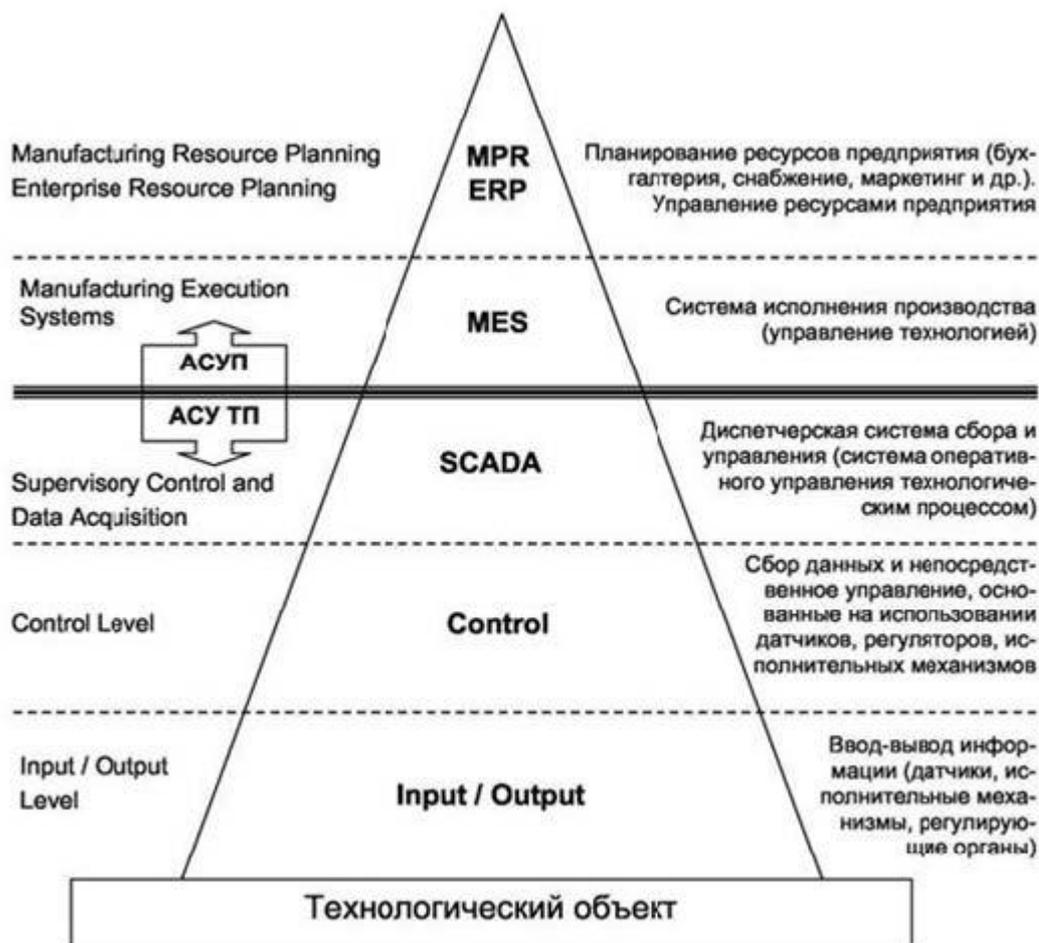


Рисунок 47 – Пирамида уровней автоматизации предприятия [52]

Нижний уровень. Уровень оборудования (входов/выходов-Input/Output). Это уровень датчиков, измерительных устройств, контролирующих управляемые параметры, а также исполнительных устройств, воздействующих на эти параметры процесса, для приведения их в соответствие с заданием. На этом уровне осуществляется согласование сигналов датчиков с входами устройства управления, а вырабатываемых команд с исполнительными устройствами.

Для создания САУ качеством воды для учета расхода воды подпитки и продувки был выбран ультразвуковой расходомер фирмы GE Panametrics [56].

Параметры расходомера приведены в ПРИЛОЖЕНИИ А. Ультразвуковые расходомеры жидкости компании GE Panametrics используют времяимпульсный способ измерения расхода. При реализации данного способа измерения расхода каждый из акустических преобразователей, установленных на трубопроводе, по очереди выполняет функции приема и излучения. Таким образом, в процессе работы каждый из преобразователей действует как передатчик, генерирующий определенное число акустических импульсов, а затем — как приемник для приема идентичного числа импульсов [56].

Уровень воды в емкости контролируется датчиком уровня ПДУ 1.1 фирмы ОВЕН. Этот датчик был выбран по принципу простоты работы для контроля уровня воды.

Датчик электропроводности Inpro7108VP/CPVC 4-электродный датчик используется для измерений в диапазонах средней / высокой электропроводности в самых различных областях применения – от питьевой воды до промышленных стоков; специальная конструкция датчиков обеспечивает стойкость к неблагоприятным воздействиям в крайне жестких условиях эксплуатации. Компактная конструкция и трубная резьба 1" обеспечивают возможность непосредственной установки датчика в трубопроводах даже небольшого диаметра. Датчик может монтироваться также в погружном корпусе InDip550 или в проточном корпусе InFlow751 [57].

Средний уровень. Уровень управления оборудованием. Это уровень контроллеров. ПЛК получает информацию с контрольно-измерительного оборудования и датчиков о состоянии технологического процесса и выдает команды управления, в соответствии с запрограммированным алгоритмом управления, на исполнительные механизмы.

На среднем уровне решаются задачи автоматического управления и регулирования, пуска и останова оборудования, логико-командного управления, аварийных отключений и защит. Средний уровень реализован контроллером фирмы Siemens S7-1200, модулями расширения ввода/вывода.

Верхний уровень. Уровень промышленного сервера, сетевого оборудования, уровень операторских и диспетчерских станций. На этом уровне идет контроль хода производства: обеспечивается связь с нижними уровнями, откуда осуществляется сбор данных, визуализация и диспетчеризация хода технологического процесса. Это уровень HMI, SCADA.

Верхний уровень реализован на HMI фирмы Siemens.

4.2 Постановка задачи стабилизационной обработки воды

В работе ставится задача создания АСУ коррекционной обработки воды для оперативного управления свойствами воды, которая позволит в режиме реального времени производить постоянную корректировку концентраций используемых реагентов в оборотной воде металлургического производства и не зависеть от данных и задержки лабораторных анализов воды. Реализация АСУ позволит существенно уменьшить количество необходимых реагентов, воды на продувку и обеспечит надежную и долговечную работу теплообменного оборудования.

Основными целями создания системы являются:

- автоматизированное управление комплексом технологического оборудования;
- повышение степени автоматизации;
- улучшение качества протекания технологических процессов;
- повышение надежности и долговечности системы;
- повышение срока службы технологических агрегатов и снижение количества аварийных ситуаций;
- сокращение количества оперативного и обслуживающего персонала;
- уменьшение эксплуатационных затрат на обслуживание технологического процесса и оборудования, в том числе средств и систем автоматизации;
- сокращение ошибочных действий оперативного персонала.

4.3 Разработка алгоритма и АСУ качеством воды

Объектом автоматизации является система коррекционной обработки воды системы оборотного водоснабжения металлургического предприятия. Важность СОВ и качество воды в ней подробно рассматривалось в главе 1 и 2.

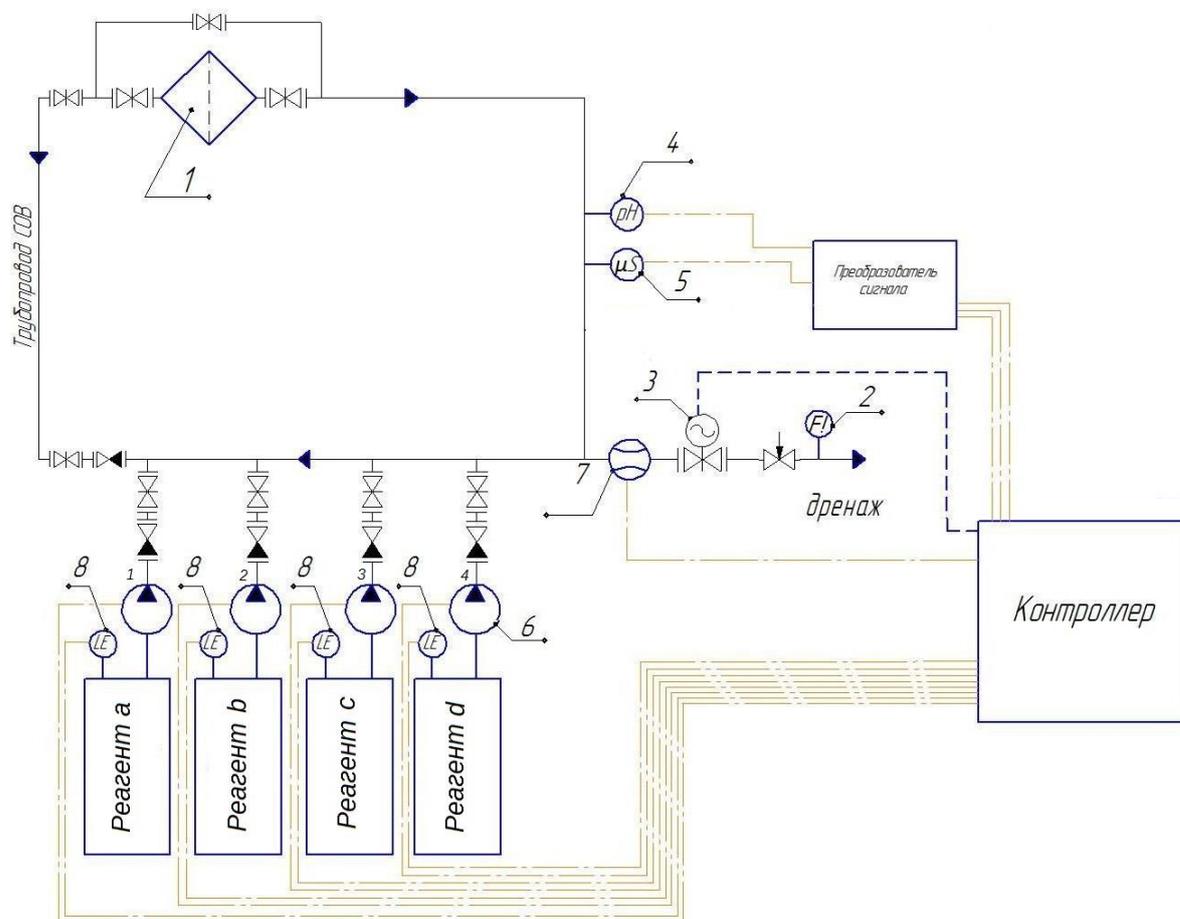


Рисунок 48 – схема коррекционной обработки: 1- механический фильтр, 2- ротаметр, 3- электромагнитный клапан, 4 – датчик рН, 5 – датчик электропроводности, 6- насосы дозирования реагентов (1-4), 7 – ультразвуковой расходомер, 8- датчики уровня

Требования к качеству воды в оборотных системах в целом сводятся к следующему: вода не должна оказывать отрицательного влияния на качество получаемого продукта; не должна вызывать образование солевых отложений, биологических обрастаний и коррозии аппаратуры, трубопроводов и сооружений; должна обеспечивать требуемое санитарно-гигиеническое состояние рабочих мест [6].

В настоящее время большинство применяемых систем автоматизированного управления (САУ) качеством воды основаны на расчетной информации по датчикам концентрации используемых реагентов и режимным картам, составляемыми специалистами при пуске и наладке СОВ.

Актуальным является создание АСУ, основанной на новом технологическом решении - создание системы управления подачей стабилизационных реагентов и продувки системы оборотного водоснабжения на основе разработанной методики для надежной и безотказной работы СОВ.

Для создания САУ обосновано использование синтеза методов исследований, с применением методов экспериментального изучения, анализа практических данных, методов математического моделирования процессов, методики использования стабилизационных реагентов оборотных систем охлаждения для разработки АСУ комплексом оборудования, поддерживающей оптимальные характеристики качества воды при ее обороте.

К АСУТП предъявляются высокие требования. При определении объема автоматизации цеха коррекционной обработки воды учитываются его производительность, режим работы, степень ответственности, требования к надежности, а также перспектива сокращения численности обслуживающего персонала, улучшение условий труда работающих, снижение потребления электроэнергии, расхода воды и реагентов.

Контролируемые параметры определяются исходя из принятой степени автоматизации сооружений, условий их эксплуатации и требований производителей эксплуатационного оборудования к составу и свойствам воды.

Система автоматизации сооружений водоснабжения должна предусматривать: автоматическое управление основными технологическими процессами в соответствии с заданным режимом или по заданной программе; автоматический контроль основных параметров, характеризующих режим работы технологического оборудования и его состояние; автоматическое регулирование параметров, определяющих технологический режим работы отдельных сооружений и их экономичность.

Для уменьшения трудоемкости, исключения контакта людей с реагентами и экономного расходования реагентов все операции, связанные с использованием химических реагентов на водоочистных станциях, максимально автоматизируются.

В качестве дозирующих устройств реагентов в автоматизированных системах рекомендуется применять насосы-дозаторы, регулирующие клапаны и бункерные дозаторы [3].

С учетом основных проблем качества воды в теплообменных аппаратах предложена технологическая схема коррекционной обработки воды СОВ на рисунке 48. Предложенная схема коррекционной обработки воды, реализована на ПЛК и НМІ. Данная схема рассматривается отдельно от общей СОВ, что делает ее универсальной. Такая система может быть интегрирована в любую СОВ испарительного типа.

В циркуляционном контуре оборотной воды системы охлаждения предусмотрена боковая механическая очистка на байпасной линии от механических примесей и взвешенных веществ. Достаточное количество воды, проходящее через боковую фильтрацию для поддержания постоянного уровня качества воды по взвешенным веществам в оборотном контуре составляет 3-5% от общей производительности всей системы.

После прохождения стадии очистки поток идет по трубопроводу с установленными на нем датчиками. На трубопровод устанавливаются точки ввода реагентов. Для реализации будущей системы на трубопроводе установлены 4 бака-дозатора для дозирования реагентов а-d в систему. Баки оборудованы насосами, с помощью которых реагенты дозируются в систему.

Блок дозирования реагентов включает в себя 4 полиэтиленовых бака с датчиками уровня, насосы-дозаторы. Контроль дозирования и визуализация уровня реагентов в баке осуществляется с помощью программируемого контроллера.

По основной байпасной линии предусмотрена продувка оборотной системы, расход продувки настраивается ручным вентилем по прибору визуального контроля.

Открытие/закрытие электромагнитного клапана (ЭМК), расположенного на линии продувки, осуществляется по команде контроллера. В программу заносятся два независимых алгоритма управления ЭМК, а также требуемые диапазоны значений показателей, поддерживаемых данной системой в оборотном контуре.

Для определения необходимости продувки контроллер осуществляет прием анализируемых датчиками данных через преобразователь сигнала и с учетом этих данных выполняет управление системой коррекционной обработки оборотной воды по разработанной программе.

Ультразвуковой расходомер передает определенное количество импульсов в зависимости от объема прошедшей через него продувочной воды. Встроенный в контроллер счетчик импульсов преобразовывает данное значение в объем и определяется необходимое число впрысков каждого реагента для достижения изначальной рассчитанной концентрации.

Программа контроля за ростом микроорганизмов в оборотной воде управляет работой двух насосов, дозирующих основной и профилактический биоцид. Эта программа состоит из двух частей:

-программа дозирования основного биоцида осуществляется по значению концентрации, передаваемого через преобразователь сигнала от датчика к контроллеру;

-программа дозирования профилактического биоцида осуществляется за счет встроенного в контроллер программируемого таймера. В программу заносятся данные, а именно: необходимые дозы, день месяца и время суток для запуска операции.

На основе описанных выше методик, подтвержденных результатами лабораторных испытаний, был разработан алгоритм (Рисунок 49). В ПРИЛОЖЕНИИ Б представлена схема автоматизации СОВ с включенной коррекционной обработкой воды.

Задание параметров		Уставки		  Close Open
V системы	<input type="text" value="***"/>	Эл-ть	<input type="text" value="***"/>	
Расход исп.	<input type="text" value="***"/>	Уровень max	<input type="text" value="***"/>	
Расход уноса	<input type="text" value="***"/>			
Получение данных				
Расход подпитки	<input type="text" value="***"/>	Расход продувки	<input type="text" value="***"/>	

Рисунок 50 – Задание параметров и получение данных

Задание уставок реагентов		
Концентрация реагента а	<input type="text" value="***"/>	
Концентрация реагента b	<input type="text" value="***"/>	
Концентрация реагента с	<input type="text" value="***"/>	
Концентрация реагента d	<input type="text" value="***"/>	

Рисунок 51 – Задание уставок дозирования реагентов



Рисунок 52 – Экран оператора при работе программы (выбора режима работы и управления насосами)

На рисунке 52 представлен экран работы программы, на котором имеется возможность нажать кнопку «Ручной режим». При включении кнопки «ручной режим» появится возможность включать/выключать насосы-дозаторы и открывать/закрывать электромагнитный клапан. По умолчанию при запуске система работает в автоматическом режиме. Также на экране расположена индикация работы насосов-дозаторов.

На рисунках 50-51 возможность задания уставок параметров системы, концентраций реагентов, а также вывод на экран численных значений подпитки и продувки, индикация работы EMK.

Разработка технического решения для контроля параметров качества воды, за счет применения новой методики позволит существенно уменьшить количество необходимых реагентов и воды на продувку. Предлагаемая система решает проблему поддержания оптимального режима работы теплообменного оборудования, при котором предусматривается надежная и долговечная работа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе приведены теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых были получены и научно обоснованы следующие научно-технические результаты:

1. Сделан обзор существующих устройств для охлаждения оборотной воды, подробно рассмотрены градирни, как наиболее часто применяющиеся для целей охлаждения воды на металлургических предприятиях. Определены основные проблемы качества воды в СОВ, оказывающие влияние на работу системы. Изучены существующие системы автоматизированного управления коррекционной обработки воды, рассмотрены их преимущества и недостатки.

2. Предложен метод дозирования стабилизационных реагентов, основанный на разделении принципов поддержания дозируемых реагентов по объемам и концентрациям, исходя из определенных экспериментальным путем рабочих концентраций и данных материального баланса самой системы.

3. Проведены экспериментальные исследования, целью которых было получение информации о возможности применения датчика электропроводности для определения необходимости продувки СОВ, используя индивидуальную зависимость электропроводности от содержания соли в воде из конкретного источника.

4. На основе предложенного метода дозирования реагентов разработана математическая модель системы оборотного водоснабжения в программном пакете MATLAB, позволяющая рассчитывать необходимое количество дозируемых реагентов для надежной и безотказной работы теплообменного оборудования.

5. Проведены теоретические и экспериментальные исследования на разработанной модели. Показано, как изменяются концентрации реагентов в СОВ и объем системы при возмущающих воздействиях разного рода: подпитки, продувки, испарения, уноса.

6. Разработан алгоритм дозирования коррекционных реагентов на основе предложенного метода, который может быть включен в алгоритм работы системы оборотного водоснабжения для достижения требуемых свойств воды оборотной системы при различных коэффициентах упаривания.

7. Разработана система автоматизированного управления поддержания свойств воды, позволяющая поддерживать концентрации используемых реагентов в заданных пределах для оптимальной работы охлаждаемого и теплообменного оборудования металлургического производства.

8. Создание АСУ коррекционной обработки воды для оперативного управления свойствами воды позволит в режиме реального времени производить постоянную корректировку концентраций используемых реагентов в оборотной воде металлургического производства и не зависеть от данных лабораторных анализов воды; позволит существенно уменьшить количество необходимых реагентов, воды на продувку и обеспечит надежную и долговечную работу теплообменного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов В. И., Ладыгичев М. Г., Ничкова И. И., Никулин В. А., Клайн С. Э., Аксенов Е. В., Водное хозяйство промышленных предприятий, справочное издание, книга 1: - М.: Теплотехник, 2005 – 640 с.
2. Абрамов Н.Н. Водоснабжение. Учебник для вузов. Изд. 2 – е, перераб. и доп. М., Стройиздат, 1974. – 480 с.
3. Алексеев Л. С., Контроль качества воды, учебник, 3-е изд., перераб. и доп.: - М.: ИНФРА-М, 2004 – 154 с.
4. Ашихмин В. Н. Введение в математическое моделирование: учебное пособие / В. Н. Ашихмин и др.; под ред. П. В. Трусова. Москва: ЛО- ГОС, 2005. - 440 с.
5. Бобков С.П. Моделирование систем: учеб. пособие / С.П. Бобков, Д.О. Бытнев; Иван. гос. хим.-технолог. ун-т. - Иваново, 2008. - 156 с.
6. Гусаковский, В.Б. и др. Водоснабжение промышленных предприятий.- Санкт-Петербург, 2003.- 155 с.
7. ГОСТ 25151-82 Водоснабжение. Термины и определения
8. Гордеев Л. С., Кадосова Е. С., Макаров В. В., Сбоева Ю. В., Математическое моделирование химико-технологических систем, учебное пособие: - М: РХТУ, 1999 – 48 с.
9. Власов К. П., Киселева А. А., Методы исследований и организация экспериментов, под ред. проф. Власова К. П.: - Харьков: Гуманитарный центр, 2002 – 256 с.
10. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: издание 2-е, перераб. и доп. Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2003. – 288 с.
11. Бельдеева, Л.Н. Технологические измерения на предприятиях химической промышленности / Л.Н. Бельдеева. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2002. – 73 с.
12. Иванов В. Г. Водоснабжение промышленных предприятий. - СПб.: Наука, 2003. - 537 с.

13. Лебедик Е.А. Управление качеством оборотной воды теплообменного оборудования / Е.А.Лебедик, Ю.В.Шариков, В.В.Железнов // Химическая технология. – 2016. – №1. – С. 38-44.
14. Лебедик Е.А. Особенности создания системы управления качеством оборотной воды теплообменного оборудования металлургических предприятий / Е.А.Лебедик, Ю.В.Шариков// Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2015. – С. 32-38.
15. Лебедик Е.А. Разработка модели технологической схемы оборотного водоснабжения металлургического предприятия с использованием программного комплекса Aspen Plus / Е.А.Лебедик, Ю.В.Шариков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – №2(56). – С. 117-120.
16. Лебедик Е.А. Управление качеством воды системы оборотного водоснабжения на металлургическом предприятии / Е.А. Лебедик, Ю.В. Шариков // Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы: сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2 ч. 1./ - Уфа: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2017. – С.62-63.
17. Гультияев А. К., Matlab 5.2, имитационное моделирование в среде Windows, практическое пособие: - М.: Корона Принт, 1999 – 288 с.
18. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии, учебник для вузов, 2-е изд., часть 1: - М.: Химия, 1995 - 400 с.
19. Бондарь А.Г. Математическое моделирование в химической технологии. «Вища школа», 1972, 280 с.
20. Болеслав В.В. Устойчивость режимов работы химических реакторов. Издательство «Химия», М.1972, 192 с.
21. Пособие по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения (к СНиП 2.04.02-84)
22. Воскресенский П.И. Техника лабораторных работ. Издательство «Химия», М., 1969. – 712 с.

23. Инструкция по эксплуатации кондуктометра AquaPro-2 [электронный ресурс]. – режим доступа: https://www.ecounit.ru/public/catalog/files/134_ap-2.pdf
24. Кульский Л.А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды. - 3-е изд., перераб. и доп. – Киев: наук. думка, 1980. – 563 с.
25. ГОСТ 18164-72.
26. ПНД Ф 14.1;2.114-97 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации сухого остатка в пробах природных сточных вод
27. Петров А.В. Моделирование систем. Учебное пособие. – Иркутск: Изд-во Иркутского госуд. Техн. Ун-та, 2000. - 268 с., ил.
28. Обыденкова С. В., Современные технологии очистки сточных вод, журнал Аква-терм, выпуск №5 (15), сентябрь 2003 – с. 37 - 39.
29. Малыгин Е. Н., Попов Н. С., Немтинов В. А., Егоров С. Я., Однолько В. Г., Информационный анализ и автоматизированное проектирование станций биохимической очистки, учебное пособие: - Тамбов: ТГТУ, 2004 – 120 с.
30. Бойков А.В. Автоматизированная система мониторинга и управления процессом производства алюминия в электролизерах с обожженными анодами.: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06. – Санкт-Петербург, 2015. – 125 с.
31. Власов С.М., Чичирова Н.Д. Разработка компьютерной программы для мониторинга, контроля и управления системы оборотного охлаждения с градирнями. Материалы докладов всероссийской молодежной конференции. «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования» / Казань, 2011. С. 58-62.
32. Власов С.М. Поддержание оптимального водно-химического режима системы технического водоснабжения с градирнями. Материалы докладов VIII межд. мол. науч. конф. «Тинчуринские чтения» / Казань, 2013. С. 135-136.
33. Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Власов С.М., Ильин О.В. Автоматизированные комплексы мониторинга и управления системами оборотного охлаждения на ТЭС // Труды Академэнерго 2012. № 4. С. 45-53.

34. Бондарь Ю.Ф. Оптимизация водно-химического режима оборотных систем охлаждения с градирнями // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. № 3 С.8-10.
35. Копылов А.С., Чудова Ю.В., Шевцова Н.С. Водно-химические расчеты в сети интернет. Программа «обработка охлаждающей воды». //Энергосбережение и водоподготовка. 2006. № 2 (40). С. 19-21.
36. Очков В.Ф., Чудова Ю.В. Новые информационные технологии для водоподготовки. С.О.К. // Сантехника и водоснабжение. 2006. № 8. С 5-7.
37. Программа «Обработка охлаждающей воды» [электронный ресурс]. – режим доступа: <http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Water/acidation.xmcd>
38. Присяжнюк В.А. Анализ воды: цели, методы, прогнозирование свойств. «С.О.К.» №№ 6-7/2005. Журнал Сантехника, Отопление, Кондиционирование.
39. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – М.: Стройиздат. 1986. – 120с.
40. И.Н. Белоглазов, Ю.В. Шариков, П.А. Петров и др. Моделирование нефтехимических процессов с использованием aspen plus: Методические указания Санкт-Петербургский горный институт (технический университет), 2011, 147с.
41. Документация к программному комплексу Аспен Плюс (AES Documentation, Aspen Plus).
42. Закгейм А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. — М.: Химия, 1973. — 224 с.
43. Документация к программному комплексу Аспен Динамикс (AES Documentation, Aspen Dynamics).
44. Выполнение анализа [электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.anchem.ru/literature/books/muraviev/034.asp>
45. Орлов А.И. Прикладная статистика / А.И. Орлов М.: Издательство «Экзамен», 2004. - 656 с.
46. Слепян Э.И., Фельдштейн Г.Н., Анапольский В.Н., Минина Е.В., Фельдштейн Е.Г., Захаров А.В. Гигиена и санитария: библиография журнала

- (1932-2005 гг.). Содержание. Значение. Перспективы. Том II. Часть I. Науч.-инженерный центр "Потенциал-2", Санкт-Петербург: Изд-во Сергея Ходова, 2009.
47. Совет экономической взаимопомощи, ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР, Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности: - М.: Стройиздат, 1978 – 590 с.
48. Сухотин А.М., Богачев А.Ф., Пальмский В.Г. и др. Коррозионная стойкость оборудования химических производств. Коррозия под действием теплоносителей, хладагентов и рабочих тел: Справ. Изд./Под ред. А. М. Сухотина, В.М. Беренблит. – Л.: Химия, 1988 – 360 с.; ил.
49. Технология 3D TRASAR® для охлаждающей воды. [Электронный ресурс]// NALCO, 2013. – режим доступа: <http://ru-eu.nalco.com/eu/services/3d-trasar-cooling-water.htm>
50. Сомов М.А. Водопроводные системы и сооружения: Учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1988. – 399. с: ил.
51. Сомов М.А., Квитка Л.А. Водоснабжение: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2007. -287 с.
52. [электронный ресурс]. – режим доступа: <http://wwtec.ru/index.php?id=356#obor>
53. Е. Л. Пехташева, А. Н. Неверов, Г. Е. Заиков, С. Ю. Софьина, Р. Я. Дебердеев, О. В. Стоянов МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ И ЗАЩИТА ОТ НЕЕ
54. Мартынов Н. Н., Иванов А. П., Matlab 5.X. Вычисления, визуализация, программирование, учебное пособие: - М.: Кудиц-образ, 2002 – 336 с.
55. Павлов Р.Д. Система управления процессом мембранной очистки оборотных промышленных вод металлургических предприятий (на примере ЗАО «МЕТАХИМ»): Дис. канд. техн. наук: 05.13.06. – Санкт-Петербург, 2010. – 177 с.
56. [электронный ресурс]. – режим доступа <http://panametrics.nt-rt.ru/images/showcase/catalogue-Panametrics.pdf>

57. [электронный ресурс]. – режим доступа <http://www.mt.com/ru/ru/home/products/Process-Analytics/conductivity-sensor/electrode/probe-InPro-7108-VP-CPVC.html>
58. Холоднов В.А. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов / В.А. Холоднов, В.П. Дьяконов, Е.М. Иванова, Л.С. Кирьянова // СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2003. – 480 с.
59. Холоднов В.А. Системный анализ и принятие решений. Компьютерные технологии моделирования химико - технологических систем / В.А. Холоднов, К. Хартманн, В.Н. Чепикова, В.П. Андреева // СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2007. – 160 с.К
60. Холоднов В.А., Лебедева М.Ю., Пунин А.Е., Хартманн К. Системный анализ и принятие решений. Компьютерные технологии решения задач многоцелевой оптимизации систем. Учебное пособие / В.А. Холоднов, М.Ю. Лебедева, А.Е. Пунин, К. Хартманн // СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2006. – 153 с.К
61. Иванов А. И., Минвалеев Р. С., Основы моделирования и первичная обработка данных, учебное пособие для студентов вузов, ч. 1: - СПб: Ютас, 2006 - 115 с.
62. Золотых Н. Ю., Использование пакета MATLAB в научной и учебной работе: - Нижний Новгород: ННГУ, 2006 – 164 с
63. Кендалл М., Стьюарт А., Статистические выводы и связи, пер. с англ., под ред. Колмогорова А. Н.: - М.: Наука, 1973 – 899 с.
64. Гублер Е. В., Генкин А. А., Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях: - Л.: Медицина, 1973 – 140 с.
65. Холлендер М., Вулф Д., Непараметрические методы статистики, пер. с англ., под ред. Адлера Ю. П., Тюрина Ю. Н.: - М.: Финансы и статистика, 1983 – 518 с.
66. Фомин В.Н. Квалиметрия. Управление качеством. Сертификация: Курс лекций // М.: Ассоциация авторов и издателей «ТАНДЕМ». Изд-во «ЭКМОС», 2000. – 320 с.

67. Александров А. Г., Артемьев В. М., Афанасьев В. Н., Ашимов А. А. и др., Справочник по теории автоматического управления, под ред. Красовского А. А.: - М.: Наука, 1987 - 712 с.
68. Юревич Е. И., Теория автоматического управления, учебное пособие: - СПб.: БХВ, 2007 – 326 с.
69. Чен К., Джиблин П., Ирвинг А., MATLAB в математических исследованиях, пер. с англ.: - М.: Мир, 2001 – 346 с.
70. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М., Практическая оптимизация, пер. с англ.: - М.: Мир, 1985 – 509 с.
71. Дьяконов В. П., MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании: - М.: СОЛОН-Пресс, 2005 – 576 с.
72. Дьяконов В. П., MATLAB 7.*/R2006/R2007, Самоучитель: - М.: ДМК Пресс, 2008 – 768 с.
73. Кетков Ю. Л., Кетков А. Ю., Шульц М. М., MATLAB 7: программирование, численные методы: - СПб: БХВ-Петербург, 2005 – 752 с.
74. Лазарев Ю., Моделирование процессов и систем в MATLAB, учебный курс: - СПб: Питер; Киев: ВНУ, 2005 – 512 с.
75. Терехин В. В., Моделирование в системе MATLAB, учебное пособие: - Новокузнецк: Кузбассвузиздат, 2004 – 376 с.
76. Цыпкин Я. З., Основы теории автоматических систем: - М., Наука, 1977 - 560 с.
77. Brian R. Hunt, Ronald L. Lipsman, Jonathan M. Rosenberg, MATLAB R2007 с нуля, пер. с англ.: - М.: ЛУЧШИЕ КНИГИ, 2008 – 352 с.
78. Lebedik E.A. Quality control of circulating water of water heat exchange equipment / E.A. Lebedik, I.V. Sharikov, V.V. Zheleznov // International research journal. – 2015. – №11(42). – P. 57-60.
79. Ким Д. П., Теория автоматического управления, Т.1, Линейные системы: - М.: Физматлит, 2003 - 288 с.

80. Ким Д. П., Теория автоматического управления, Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы, учебное пособие: - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004 - 463 с.
81. Андриющенко В. А., Теория систем автоматического управления, учебное пособие: - Л.: ЛГУ, 1990 - 256 с.
82. Черных И.В. SIMULINK - среда создания инженерных приложений // М.: «Диалог-МИФИ», 2004. – 491с.
83. Мирошник И. В., Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы, учебное пособие: - СПб.: Питер, 2006 - 272 с.
84. Попов Е. П., Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления, учебное пособие, 2-е изд., стер.: - М.: Наука, 1988 - 256 с.
85. Alberto Bemporad, Manfred Morari, N. Lawrence Ricker, Model predictive control, MathWorks, 2010 – 205 с.
86. Брюханов В. Н., Косов М. Г., Протопопов С. П., Соломенцев Ю. М., Теория автоматического управления, 3-е изд., стер.: - М.: Высшая школа, 2000 - 270 с.
87. Заболотнов Ю. М., Оптимальное управление непрерывными динамическими системами: - Самара: СГАУ, 2005 – 129 с.
88. Черноруцкий И. Г., Методы оптимизации в теории управления, учебное пособие: - СПб.: Питер, 2004 - 256 с.
89. Reklaitis G. V., Ravindan A., Ragsdell K. M., Engineering Optimization. Method and Applications, P.1: - NewYork: Wiley-Interscience, 1983 - 350 с.
90. Шариков Ю.В. Моделирование процессов и объектов в химических технологиях. Конспект лекций – Санкт-Петербург, 2012.
91. Reklaitis G. V., Ravindan A., Ragsdell K. M., Engineering Optimization. Method and Applications, P.2: - NewYork: Wiley-Interscience, 1983 - 320 с.
92. Красовский А. А., Статистическая теория переходных процессов в системах управления: - М., Наука, 1968 - 240 с.
93. Симановский А. Ю., Типы регуляторов, методика настройки регуляторов, инструкция: - Ивано-Франковск: html-формат, 2004 - 63 с.

94. Романков П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П.Г. Романков, М.И. Курочкина // Л.: Химия, 1974. – 288 с.
95. Романков П.Г. Процессы и аппараты химической промышленности / П.Г. Романков, М.И. Курочкина, Ю.Я. Моржерин, Н.Н. Смирнов // Л.: Химия, 1989. – 560 с.
96. Романков П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская // Л.: Химия, 1979. – 272 с.
97. Турчак Л. И., Плотников П. В., Основы численных методов, учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп.: - М.: Физматлит, 2003 – 304 с.
98. Советов Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев // М.: Высшая школа, 1985. – 272 с.
99. Строителев В.Н. Статистические методы – основной инструмент специалиста в области качества // Качество, инновации, образование. – 2002. – №1. – С. 11-17.
100. Kraslawski A. Optimal design of a solid-liquid separation system. Proceedings of the 23 ES on Computer Aided Process Engineering, 9-12.07.2013.- P. 907-912.
101. Штерензон В.А. Моделирование технологических процессов: конспект лекций / Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. 66 с.
102. Фрог Б. Н., Левченко А. П. Водоподготовка: Учебн. пособие для вузов. - Москва: Издательство МГУ, 1996. – 680 с, 178 ил.
103. Шкроб М.С., Вихрев В.Ф. Водоподготовка. Учебник для вузов 2-е изд., перераб. и доп. Под ред. Шкроба М.С. — М.: Энергия, 1973. — 416 с.: ил.
104. Шабалин А.Ф. Обратное водоснабжение промышленных предприятий. - М.: Стройиздат, 1972.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Характеристики	Модификация			
	PT878	DF868	XMT868i	AT868
Предел допускаемой относительной погрешности измерения скорости, объемного расхода и количества, %*: 1. накладные датчики: 2. стационарные датчики:			1 1	
Исполнение:	Портативное	Стационарное		
Максимальное количество каналов измерения расхода:	1	2		
Диапазон измерения скорости, м/с**:	0—12,2			
Внешний диаметр трубопровода, мм: 1. накладные датчики: 2. стационарные датчики:		12,7—5080 1,0—5080,0		
Динамический диапазон:	400:1			
Воспроизводимость, %: 1. накладные датчики: 2. стационарные датчики:		0,2—0,5 0,2		
Диапазон измерения толщины стенки трубопровода, мм	1,3—76,2	—		
Предел допускаемой относительной погрешности измерения толщины стенки трубопровода, %	1,0	—		
Температура жидкости, °С:	от -190 до +260			
Температура окружающей среды, °С: рабочая: хранения:		от -10 до +50 от -10 до +75		
Длина измерительных участков, D***:	10D/5D			
Количество входных сигналов: аналоговые 0/4-20 мА: для термометров сопротивления:	— 2		0—4	— —
Количество выходных сигналов: аналоговые 0/4-20 мА: импульсные: частотные до 1000 Гц: цифровые (один на расходомер-счетчик), тип:	1 1 1 ИК-порт	2—12 0—12 0—12 RS232	2—4 0—4 0—4 ИК-порт	1—2 1—2 1—2 RS232/RS485 RS232/RS485
Питание, В: напряжение постоянного тока:	12 ±25 %	12—28 ±10 %		
напряжение переменного тока:	200—240 ±10 %, 50/60 Гц			
Габаритные размеры, мм:	238 x 138 x 38	362 x 290 x 130	208 x 168	202 x 155 x 91
Масса, кг:	1,36	5	4,5	2

Рисунок 53 – Параметры ультразвукового расходомера

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

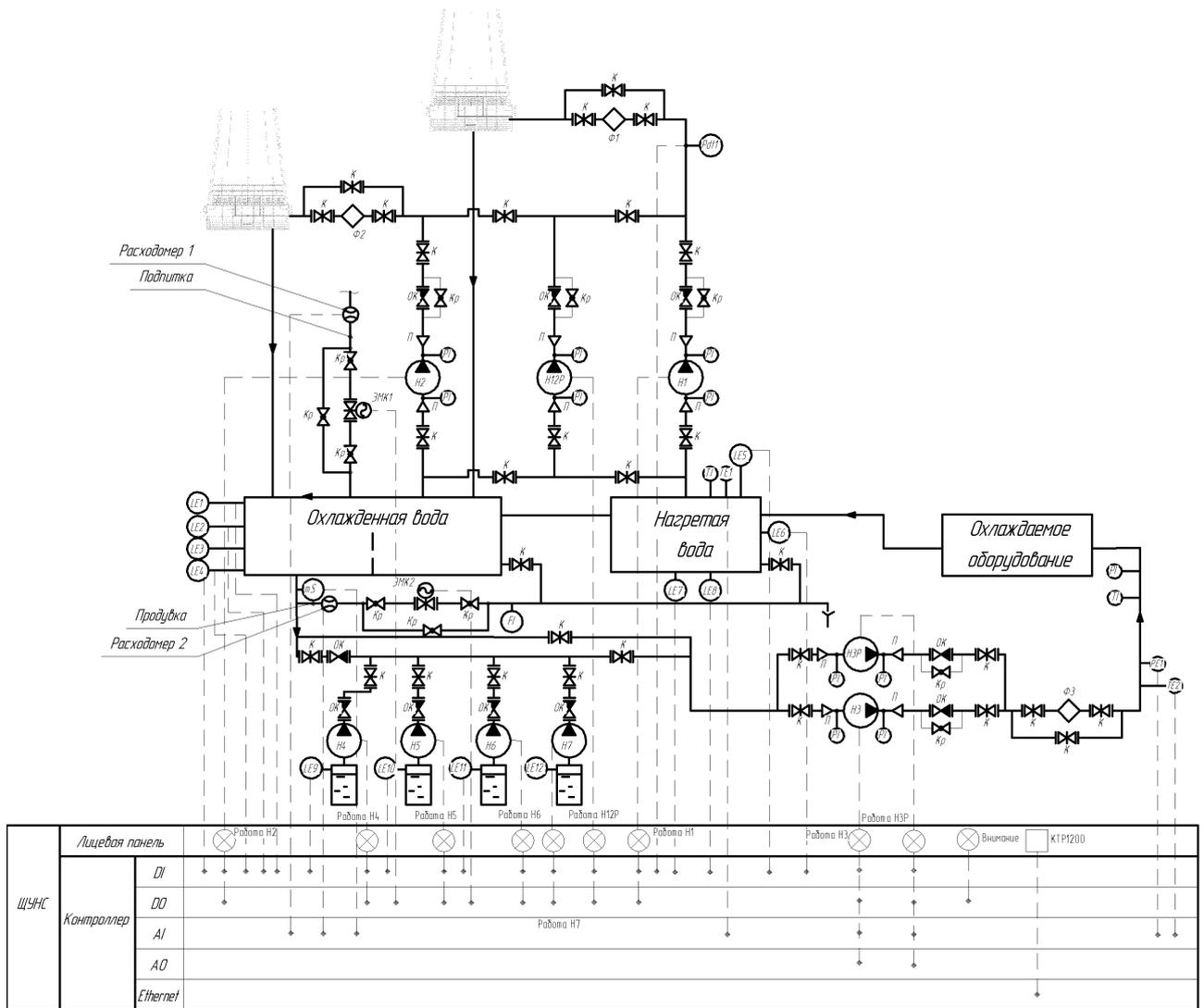


Рисунок 54 – АСУ СОВ