

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»

*На правах рукописи*

**Надеждин Игорь Сергеевич**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ВОДООЧИСТНОЙ УСТАНОВКОЙ  
С ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (химическая промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук  
Горюнов Алексей Германович

Томск – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                                              | 4  |
| 1 Анализ электроэрозионного процесса очистки воды.....                                                                                                                     | 11 |
| 1.1 Анализ работ, посвященных процессу электрической эрозии .....                                                                                                          | 12 |
| 1.2 Описание электроэрозионного процесса очистки воды.....                                                                                                                 | 17 |
| 1.3 Анализ электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления .....                                                                                           | 22 |
| 1.4 Выводы по главе .....                                                                                                                                                  | 31 |
| 2 Разработка математической модели электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления.....                                                                    | 33 |
| 2.1 Разработка подхода моделирования процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе.....                                  | 34 |
| 2.1.1 Общие сведения о методе клеточных автоматов.....                                                                                                                     | 35 |
| 2.1.2 Применение вероятностных клеточных автоматов для моделирования процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе ..... | 38 |
| 2.2 Разработка математической модели процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе.....                                  | 45 |
| 2.3 Разработка математической модели образования продуктов электрической эрозии металлических шариков в водном растворе .....                                              | 54 |
| 2.4 Проверка адекватности разработанной математической модели электроэрозионного процесса очистки воды .....                                                               | 68 |
| 2.5 Выводы по главе .....                                                                                                                                                  | 75 |
| 3 Разработка автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистой установкой.....                                                                           | 77 |
| 3.1 Функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистой установкой .....                                                              | 78 |

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2 Датчик концентрации компонентов в растворе .....                                                                     | 79  |
| 3.2.1 Общие сведения об оптических измерительных системах.....                                                           | 81  |
| 3.2.2 Оптический датчик концентрации продуктов электрической<br>эрозии в обработанном водном растворе .....              | 87  |
| 3.3 Управление на базе прогнозирующей модели .....                                                                       | 91  |
| 3.3.1 Сравнение МРС регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой<br>логикой .....                                              | 92  |
| 3.3.2 Общие сведения о методе управления на базе прогнозирующих<br>моделей.....                                          | 99  |
| 3.3.3 Упрощенная математическая модель объекта управления .....                                                          | 103 |
| 3.3.4 Параметрический синтез МРС регулятора.....                                                                         | 109 |
| 3.4 Исследование разработанной системы управления с помощью<br>компьютерного моделирования.....                          | 111 |
| 3.5 Выводы по главе .....                                                                                                | 115 |
| 4 Обобщение и практическое применение результатов диссертационного<br>исследования.....                                  | 117 |
| 4.1 Реализация автоматизированной системы управления<br>электроэрозионной водоочистой установкой .....                   | 117 |
| 4.2 Принцип управления химико-технологическими процессами на базе<br>прогнозирующих моделей.....                         | 123 |
| 4.3 Интеллектуальный многопараметрический измерительный<br>преобразователь на базе оптических измерительных систем ..... | 126 |
| 4.4 Выводы по главе .....                                                                                                | 133 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                         | 135 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                                                   | 140 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов диссертационного<br>исследования ООО «ТКГЭ».....                                | 159 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение .....                                                                                 | 160 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении результатов диссертационного<br>исследования ОАО «Манотомь» .....                           | 162 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Функционирование современных технологических процессов, как правило, не обходится без автоматизированных систем управления. Необходимость в разработке и применении систем управления для различных технологических процессов обусловлена требованиями повышения эффективности, безопасности и стабильности протекания процессов [1]. Особенно актуальной задачей это является для технологических процессов химической, атомной, нефте- и газоперерабатывающей промышленности, где предъявляются повышенные требования к безопасности протекания процессов, в силу того, что в ряде случаев эти процессы, являются взрыво- и пожароопасными, вредными для организма человека, а также образуют большое количество отходов, которые можно использовать в качестве вторичного сырья.

Частным случаем химико-технологических процессов являются процессы, протекающие в водоочистных установках. Очистка природных и промышленных сточных вод от вредных примесей является актуальной задачей [2, 3]. На сегодняшний день известно много методов, используемых для решения этой задачи. Наиболее распространенными методами водоочистки являются: обратный осмос, коагуляция, ионообменное осаждение, аэрация, отстаивание и т.д. Эти классические методы водоочистки обладают достоинствами и недостатками. Среди существенных недостатков можно выделить следующие: высокий расход реагентов; необходимость периодической замены мембран; высокая стоимость мембран и реагентов; требуются большие площади, для размещения оборудования; и самый главный недостаток состоит в том, что с помощью перечисленных методов практически невозможно (или не эффективно) очищать водные источники от токсичных веществ (мышьяк) и растворенных солей [4]. В связи с этим, в последнее время, интерес исследователей направлен на применение электрической энергии для очистки водных источников [5, 6]. Одним из таких

методов, основанном на использовании электрической энергии, является очистка воды с помощью электроэрозионной обработки металлических шариков в очищаемой воде. Для управления и повышения эффективности современных водоочистных установок разрабатываются системы управления [7, 8].

Актуальность создания автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой обусловлена необходимостью повышения эффективности процесса водоочистки и отсутствием наработок в области разработки систем управления электроэрозионными водоочистными установками.

**Цель** диссертационной работы заключается в повышении эффективности химико-технологического процесса за счет использования автоматизированной системы управления с прогнозирующей моделью на примере электроэрозионной водоочистной установки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- анализ электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления;
- разработка математической модели электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления;
- разработка системы управления электроэрозионной водоочистной установкой;
- обобщение и практическое применение результатов диссертационного исследования.

**Объектом исследования** в работе является электроэрозионная водоочистная установка в части процесса образования продуктов электрической эрозии, а также алгоритмы управления и контрольно-измерительные приборы автоматизированной системы управления технологическими процессами установки.

**Предметом исследования** являются эффективность технологического процесса образования продуктов электрической эрозии металлических шариков в водном растворе; математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды; структурный и параметрический синтез автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой с прогнозирующей моделью.

**Научную новизну** составляют следующие результаты диссертационного исследования:

- предложена математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды, учитывающая геометрические размеры используемого аппарата, массу и размеры загружаемых металлических шариков, электрофизические свойства обрабатываемого водного раствора и позволяющая решать задачи синтеза систем управления и оптимизации;
- на базе предложенной математической модели разработана автоматизированная система управления электроэрозионной водоочистной установкой, позволяющая стабилизировать концентрацию продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе;
- развит принцип управления химико-технологическими процессами, отличающийся наличием адаптивной прогнозирующей модели процесса и блока оптимизации для формирования оптимального управляющего воздействия и позволяющий повысить эффективность и безопасность протекания химико-технологических процессов (защищен патентом на изобретение № 2657711).

**Теоретическая значимость** работы заключается:

- в расширении использования метода клеточных автоматов для моделирования процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе;
- в развитии принципа управления химико-технологическими процессами с применением адаптивной прогнозирующей модели процесса.

**Практическая значимость работы заключается:**

- в повышении эффективности и безопасности протекания химико-технологических процессов, за счет применения развитого принципа управления с адаптивной прогнозирующей моделью процесса;
- во внедрении результатов диссертационного исследования в автоматизированную систему управления электроэрозионной водоочистной установкой ООО «ТКГЭ», что обеспечило снижение затрат электроэнергии на процесс очистки воды, при сохранившемся качестве очищенной воды;
- в создании и практическом применении опытного образца интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных кабелей.

**Методы исследования.** Для достижения сформулированной цели и решения поставленных задач в работе были использованы методы математического и компьютерного моделирования, методы теории автоматического управления, а также метод системного подхода для комплексного решения задач контроля, управления и оптимизации процесса.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- предложенная математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды позволяет решать задачи синтеза систем управления и оптимизации с учетом геометрических параметров аппаратов и массы загружаемых металлических шариков;
- разработанная, на базе предложенной математической модели, автоматизированная система управления электроэрозионной водоочистной установкой обеспечивает автоматическую стабилизацию концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе с помощью контроля концентрации оптическим датчиком;

- принцип управления на базе адаптивной прогнозирующей модели позволяет повысить эффективность и безопасность протекания химико-технологических процессов.

**Достоверность результатов диссертационного исследования** подтверждена успешным испытанием системы автоматизированного управления электроэрозионной водоочистной установкой ООО «ТКГЭ», а принятые в работе авторские решения основаны на известных и проверенных методах и методиках разработки систем управления и контроля технологических процессов. Положения диссертации базируются на анализе и практических результатах автоматизации химико-технологических процессов, обобщении передового опыта в области теории математического моделирования и автоматического управления. Сопоставление авторских данных и данных, представленных в независимых источниках по рассматриваемой тематике, опубликованных ранее, позволило установить их качественное и количественное соответствие.

**Апробацию** представляемая работа прошла на:

- VII Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (Томск, 2015);
- 18-ой Международной конференции «Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES'15)» (Кучинг, Малайзия, 2015);
- Седьмой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015) (Москва, 2015);
- 24-ой Международной конференции «International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS 2016)» (Гонконг, КНР, 2016);

- 19-ой Международной конференции «Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES'16)» (Прага, Чешская Республика, 2016);
- 64-ой Международной молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Наука. Инновации» (Владивосток, 2016);
- XXII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2017» (Томск, 2017);
- 20-ой Международной конференции «Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES'17)» (Тяньцзинь, КНР, 2017);
- Восьмой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017) (Санкт-Петербург, 2017).

**Публикации** по теме диссертационного исследования составляют перечень из 22 работ, среди которых: 3 статьи в рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук и рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации; 9 публикаций в зарубежных изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science; 1 статья в издании, не относящемся к перечисленным выше; 6 тезисов докладов на международных конференциях; 1 патент на изобретение; 2 отчета о НИР.

Публикации [9-13] посвящены анализу электроэрозионного процесса очистки воды и разработке математической модели процесса, в работах [14, 15] представлены результаты исследования систем управления на базе ПИД-регулятора с нечеткой логикой и с MPC регулятором, статьи [16-19] посвящены разработке автоматизированной системы управления

электроэрозионной водоочистой установкой, в публикации [20] описан принцип управления химико-технологическими процессами на базе адаптивной прогнозирующей модели, в статьях [21, 22] представлен алгоритм пассивной идентификации параметров объекта управления в замкнутом контуре, в работах [23, 24] описаны результаты разработки измерительных устройств на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных кабелей.

**Реализация результатов диссертационной работы** стала возможной благодаря финансовой поддержке:

- Грант Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ), на выполнение работ по инициативному научному проекту, выполняемому молодыми учеными (Мой первый грант) № 16-31-00085 «Математическое моделирование и оптимизация электроэрозионного метода очистки воды»;
- Государственное задание № 8.3079.2017/ПЧ Министерства образования и науки Российской Федерации и договор с индустриальным партнером ОАО «Манотомь» по теме «Разработка интеллектуального датчика дифференциального давления с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации», в рамках которых разработаны многопараметрические сенсоры технологических переменных (давление, концентрация, расход).

**Структуру диссертации** образуют введение, четыре раздела, заключение, список литературы и три приложения.

## **1 Анализ электроэрозионного процесса очистки воды**

Эффективность технологического процесса в целом зависит от эффективной работы каждого отдельного аппарата, включенного в этот процесс. Для каждого конкретного технологического процесса определяется свой показатель эффективности, иногда и не один. Отклонение значения показателя эффективности технологического процесса от заданной величины может быть вызвано как наличием внешних возмущающих воздействий, так и особенностями протекания самого технологического процесса. Отсюда возникает необходимость разработки системы управления, обеспечивающей поддержание показателя эффективности технологического процесса на заданном уровне или его оптимизацию в течении протекания технологического процесса. Для разработки системы управления требуется математическая модель технологического процесса как объекта управления. Прежде чем приступать к разработке математической модели процесса, целесообразно провести анализ технологического процесса как объекта управления.

В данной главе с целью изучения имеющихся наработок в области моделирования и автоматизации электроэрозионного процесса очистки воды был произведен литературный обзор работ, посвященных применению электрической эрозии в промышленности и для очистки природных и промышленных сточных вод, в частности. Представлено описание технологического процесса очистки воды с помощью электроэрозионной обработки металлических шариков. Помимо описания технологии, проведен анализ технологического процесса как объекта управления, а также произведена классификация входных и выходных переменных. Обоснована целесообразность разработки математической модели процесса как объекта управления, для дальнейшего использования при синтезе системы управления.

### 1.1 Анализ работ, посвященных процессу электрической эрозии

Первое упоминание о явлении эрозии металлов в результате воздействия на металлическую деталь электрического тока возникло в ходе изучения данного явления английским ученым Д. Пристли в конце 18 века. Он заметил, что в момент разрыва электрической цепи, в самом месте разрыва, образуется электрическая искра. Причем само возникновение искры приводило к достаточно заметному повреждению поверхностей контактов размыкаемой цепи. Такие повреждения сопровождались интенсивным съемом металла. Это открытие и получило название электрической эрозии. Изначально это явление воспринималось достаточно негативно и не давало предпосылок к его промышленному применению. Однако, в годы Великой Отечественной Войны супруги Б.Р. и Н.И. Лазаренко работали над проблемой устранения разрушения от электрической эрозии высоковольтных выключателей. Проводимые ими эксперименты показывали, что после размыкания электрической цепи в жидком диэлектрике жидкость становилась более мутной сразу же после первых электрических разрядов между контактами. В результате они установили, что из-за электрической эрозии металлических электродов в рабочей жидкости появляются мельчайшие частицы металла – происходил съем металла с поверхностей электродов. В результате исследований в 1943 году ими был предложен новый способ обработки металлов и других токопроводящих материалов с помощью потока электронов, возникающего при электрическом разряде (электроэрозионная обработка) [25, 26].

Схема электроэрозионной установки для обработки металлических изделий, предложенная супругами Б.Р. и Н.И. Лазаренко, приведена на рисунке 1. Напряжение питания заряжает конденсатор (3), параллельно которому включен разрядный промежуток между электродом-инструментом (1) и обрабатываемой деталью (2), которые помещены в рабочую жидкость, обладающую низкой диэлектрической проницаемостью.

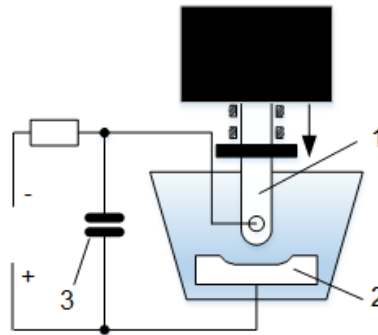


Рисунок 1 – Схема первой электроэрозионной установки

Когда напряжение на конденсаторе превышает потенциал зажигания разряда, происходит пробой жидкости. Жидкость нагревается до температуры кипения и образуется газовый пузырь из паров жидкости. Далее электрический разряд развивается в газовой среде, что приводит к интенсивному локальному разогреванию детали, приповерхностные слои материала плавятся и продукты расплава в виде шариков застывают в рабочей жидкости. На поверхности электродов появляются эрозионные лунки в местах действия электрического разряда, которые образуются из-за удаления некоторого количества металла. После прекращения действия электрического разряда начинается процесс нейтрализации заряженных частиц, и электрическая прочность рабочей жидкости восстанавливается – этот процесс называется деионизацией. Если на электрод периодически поступает импульс электрического напряжения, то процесс будет возобновляться, причем очередной разряд будет происходить в месте, где будет существовать наименьшее расстояние между электродом и обрабатываемой деталью.

В 40-50-х годах 20 века, явление электрической эрозии применялось исключительно для обработки металлических изделий. В те годы использовались электроэрозионные установки с традиционной конфигурацией электродов «электрод-изделие» (рисунок 1). Используемая технология электроэрозионной обработки металлических изделий не претерпевала серьезных изменений с момента ее разработки супругами Лазаренко.

Наиболее стремительное развитие электроэрозионная обработка материалов получила в 1967 г., когда в результате исследований японского ученого В. Ишибаши, было предложено использование новой конфигурации электродов для электроэрозионной обработки материалов [27, 28]. Суть новой конфигурации состояла в том, что пространство между электродами заполнялось металлическими гранулами (шариками) из того же материала, что и электроды. Использование такой конфигурации электродов привело к повышению выхода продуктов эрозии, в результате увеличения искровых взаимодействий.

Предложенные В. Ишибаши изменения в технологии электроэрозионной обработки металлических изделий послужили предпосылками для создания новой технологии получения высокодисперсных металлических порошков и обозначили перспективы новых исследований для многих ученых [29-35]. Суть нового процесса получения металлических порошков заключалась в том, что при прохождении электрических импульсов между металлическими гранулами (шариками), помещенными в межэлектродное пространство, которое заполнено диэлектрической жидкостью, появляется искровой разряд одновременно между несколькими металлическим гранулами (шариками). Это привело к увеличению выхода продуктов электрической эрозии, которые представляют из себя высокодисперсные металлические порошки.

В 70-х годах 20 века велись работы по изучению импульсного электрического пробоя жидкостей. Импульсные электрические разряды являются сложным физико-химическим явлением, которое можно охарактеризовать разнообразием энергий, электрофизических, временных и размерных характеристик, сочетанием ряда стадий и внешних проявлений. Кроме того, это разнообразие усиливается возможностью осуществления разрядов в многофазных средах. Научный коллектив под руководством В.Я. Ушакова исследовал основные физические явления и процессы, которые обуславливают импульсный электрический пробой жидкостей [36]. Так же исследованиями гидродинамических явлений при электрических разрядах в

жидкости занимались ученые под руководством К.А. Наугольного [37]. Более детальное изучение процессов, протекающих при электроэрозионной обработке слоя металлических гранул дало развитие не менее перспективному направлению исследований, а именно применению электрической эрозии металлов для очистки воды.

Начиная с середины 80-х годов 20 века появились публикации, посвященные электроэрозионному методу очистки воды в аппаратах с металлической загрузкой в виде металлических гранул (шариков) [38-40]. Некоторые разработки были доведены до уровня патента [41, 42].

Довольно активно в этом направлении работали украинские ученые под руководством А.А. Щербы [43-47]. Проводимые исследования были посвящены разработке и оптимизации рабочих режимов генераторов электрических импульсов, используемых для электроэрозионной обработки слоя металлических гранул в водном растворе. Некоторые разработки научного коллектива под руководством А.А. Щербы доведены до уровня патента [48, 49].

Группой российских ученых, на основе фундаментальных исследований В.Я. Ушакова [36], проводились исследования по использованию импульсных электрических разрядов в ряде прикладных задач [50-52], в том числе и для очистки водных источников. Применение электрического разряда для очистки воды связано с его способностью инициировать процессы образования широкого спектра короткоживущих активных частиц – радикалов и ионов, под действием которых происходит деструкция и окисление содержащихся в воде примесей. В ходе этих исследований была разработана и реализована установка для электроэрозионной очистки воды. Используя данную установку были проведены исследования, направленные на изучение кинетики физико-химических процессов, протекающих в аппарате при воздействии электрических разрядов на слой металлических гранул (шариков) в водных растворах [53-55]. В ходе данного исследования была составлена схема физико-химических процессов, для таких химических соединений, как

$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{CrO}_4$  и др. Также в работе [55] представлено эмпирическое выражение для определения количества эродированного металла в зависимости от времени. Недостатком этого выражения является то, что оно было получено для аппарата определенного объёма, с определенной массой загруженных шариков, с определенными характеристиками подаваемых электрических импульсов и с определенными свойствами водного раствора. Применение этого выражения будет не корректным, при изменении одного из параметров процесса. Кроме того, последние исследования в данной области были направлены на изучение процесса очистки воды от гуминовых веществ с помощью электроэрозионной обработки водных растворов [56, 57].

В последнее десятилетие, кроме работ, посвященных изучению физико-химических процессов, протекающих при электроэрозионной очистке воды, публикуются научные работы, посвященные математическому моделированию процесса электроэрозионной обработки металлических изделий. Разрабатываемые математические модели описывают отдельные стадии электроэрозионной обработки, например, образование лунок на поверхности обрабатываемой детали [58-61], распределение электрических разрядов в жидком диэлектрике [62, 63], моделирование шероховатости обрабатываемых изделий [64] и т.д. Стоит отметить, что модели, представленные в данных работах, не подходят для описания электроэрозионного процесса очистки воды, так как рассматривают процессы только для электроэрозионных станков, предназначенных для обработки деталей. То есть в таких работах рассматривается система «электрод-изделие» и возникающие между ними импульсные электрические разряды. При этом электрод и изделие помещены в жидкость с низкой диэлектрической проницаемостью.

Таким образом, исходя из проведенного литературного обзора, посвященного анализу применения электрической эрозии в промышленности, можно заключить, что процесс электрической эрозии нашел широкое применение для обработки металлических деталей, а также для получения

высокодисперсных металлических порошков и для очистки загрязненной воды. При этом большое количество работ, посвящено изучению физико-химических процессов, протекающих при электроэрозионной очистке воды. Математические модели электроэрозионного процесса, представленные в литературе, не могут быть применены для описания процессов, протекающих в электроэрозионной водоочистной установке. В литературе не обнаружено работ, посвященных оптимизации или разработке системы управления электроэрозионной водоочистной установкой.

## **1.2 Описание электроэрозионного процесса очистки воды**

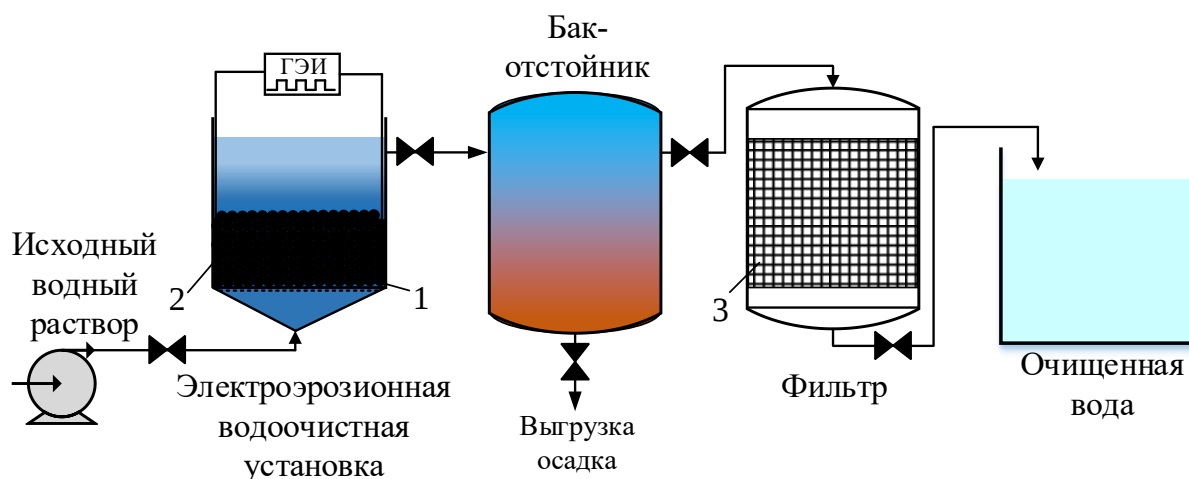
Очистка водных источников от вредных примесей является актуальной задачей. Количество публикаций, посвященных этой проблеме растёт с каждым годом [2, 3]. Для решения этой проблемы применяются различные и широко известные методы водоочистки: обратный осмос, коагуляция, ионообменное осаждение, аэрация, отстаивание и т.д. [4, 65]. Каждый из упомянутых методов обладает рядом достоинств и недостатков. Среди существенных недостатков можно выделить следующие: высокий расход реагентов; необходимость периодической замены мембран; высокая стоимость мембран и реагентов; требуются большие площади, для размещения оборудования; и самый главный недостаток состоит в том, что с помощью перечисленных методов практически невозможно (или не эффективно) очищать водные источники от вредных примесей, находящихся в растворенном состоянии в воде. Для устранения и уменьшения влияния перечисленных недостатков разрабатываются многостадийные технологические схемы водоочистки [66, 67]. Также ведутся работы, направленные на разработку систем автоматического управления и оптимизации перечисленных методов [68, 69].

В последнее время, интерес исследователей направлен на применение электрической энергии для очистки водных источников [5, 6]. Одним из таких

методов, основанном на использовании электрической энергии, является очистка воды с помощью электроэрозионной обработки слоя металлических шариков в очищаемой воде. Интерес в использовании электрической эрозии для очистки воды заключается в том, что этот метод базируется на дешевом сырье (металлические шарики) и характеризуется относительно малой энергоемкостью.

Основной областью применения электроэрозионного метода очистки воды является очистка промышленных сточных вод от растворенных в них веществах. Так в работе [38] предлагается применение электроэрозионного метода водоочистки для очистки сточных вод машиностроительных предприятий, в статье [47] описаны перспективы применения электроэрозионного метода водоочистки в системах водоподготовки тепловых сетей, в публикациях [39, 40] представлены результаты исследований по очистке промышленных сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью электроэрозионного метода водоочистки. Кроме того, исследования последних лет посвящены успешному применению электроэрозионного метода для очистки природных вод от содержащихся в них вредных примесей, таких как гуминовые вещества, силикаты и ионы тяжелых металлов, которые в совокупности могут образовывать коллоидные растворы, устойчивые к физико-химическим воздействиям [56, 57].

Современные водоочистные комплексы являются сложными многостадийными процессами. Электроэрозионный процесс очистки воды также является одной из стадий технологического процесса водоочистки. Главная цель применения электроэрозионного процесса для очистки воды заключается в том, чтобы перевести растворенные в воде вредные примеси в нерастворимый осадок, который затем удаляется из воды с помощью классических методов, таких как отстаивание и фильтрация [47]. Аппаратурно-технологическая схема очистки воды с помощью электроэрозионного метода представлена на рисунке 2.



1 – металлические шарики загрузки, 2 – электроды, 3 – фильтрующая загрузка

Рисунок 2 – Аппаратурно-технологическая схема очистки воды с помощью электроэрозионного метода

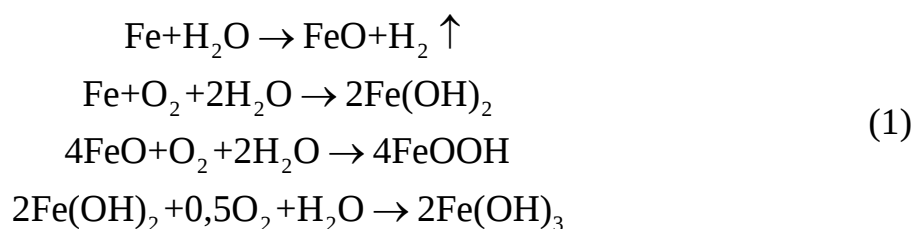
В состав аппаратурно-технологической схемы (рисунок 2) входит:

- электроэрозионная водоочистная установка, состоящая из бака-реактора, в котором происходит электроэрозионная обработка слоя металлических шариков в водном растворе и генератор электрических импульсов (ГЭИ), который построен по принципу разряда емкостного накопителя через быстродействующий тиристор;
- бак-отстойник, предназначенный для протекания химических реакций взаимодействия образовавшихся продуктов электроэрозии и примесей, содержащихся в очищаемой воде, а также для осаждения образовавшихся продуктов;
- фильтр, предназначенный для очистки воды от взвешенных веществ путем механической фильтрации;
- бак для очищенной воды.

Технология очистки воды на основе электрической эрозии слоя металлических шариков заключается в следующем. В межэлектродное пространство бака-реактора электроэрозионной водоочистной установки засыпают металлические шарики. Масса загружаемых шариков зависит от размеров бака-реактора и производительности установки. Например, для

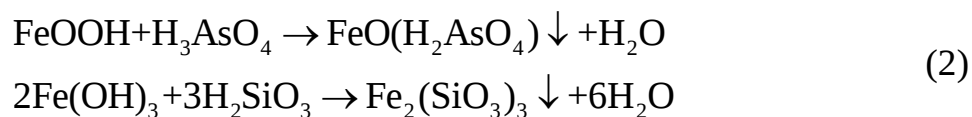
установки производительностью 1 м<sup>3</sup>/ч используется порядка 1,5 кг металлических шариков, при этом слой загруженных в аппарат шариков не превышает 40 мм. Как правило используются шарики диаметром 6–8 мм. Через бак-реактор прокачивается исходный водный раствор, предназначенный для очистки от вредных примесей. Водный раствор подается в бак-реактор снизу, через коллектор. Затем водный раствор перемещается по баку-реактору снизу-вверх, через загрузку металлических шариков. В это время, через слой металлических шариков пропускают электрические импульсы короткой длительности ( $\approx 20$  мкс). При пропускании электрических импульсов через слой металлических шариков, в местах соприкосновения шариков друг с другом, возникают электрические разряды, которые характеризуются большой энергией. В результате этих разрядов на поверхности металлических шариков происходит процесс электрической эрозии, то есть происходит сверхбыстрое изменение агрегатного состояния поверхности металлических шариков (плавление) и выброс продуктов эрозии в межгранульные промежутки, заполненные обрабатываемой водой. Выделившиеся продукты эрозии представляют собой частицы металла. Затем обработанный водный раствор поступает в бак-отстойник.

Продукты электрической эрозии металлических шариков, образовавшиеся в результате разряда, окисляются водой и растворенным в ней кислородом. В результате окисления образуются активные гидроксиды и оксиды металла, которые являются активными коагулянтами. Окисление продуктов эрозии протекает по следующим химическим реакциям:



Образовавшиеся гидроксиды и оксиды эффективно сорбируют примеси, содержащиеся в воде и образуют нерастворимые соли, которые выпадают в

осадок. Осаждение примесей, например, мышьяка (As) и кремния (Si), протекает по следующим химическим реакциям:



Адсорбированные и скоагулированные примеси, представляют собой нерастворимые частицы, которые затем извлекаются из обработанной воды. При этом стоит отметить, что все химические процессы, окисление продуктов эрозии и взаимодействие образовавшихся оксидов с примесями, протекают в баке-отстойнике, в котором также происходит осаждение образовавшихся продуктов. Осадок из бака-отстойника перерабатывается путем высушивания и прокаливания в оксиды железа для дальнейшего применения в катализе, при производстве высокодисперсных металлических порошков, пигментов и др. Затем водный раствор поступает на фильтр, предназначенный для удаления из воды взвешенных веществ путем механической фильтрации. В качестве наполнителя в фильтре используется дробленый керамзит. Отфильтрованная вода поступает в резервуар с чистой водой.

Трудно представить современные технологические процессы без автоматизированных систем управления. Для повышения эффективности современных водоочистных установок также разрабатываются системы управления [70]. В результате анализа литературных источников и патентных документов не было выявлено работ, посвященных разработке системы управления электроэрозионной водоочистной установкой. В связи с этим, разработка системы управления электроэрозионной водоочистной установкой является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность электроэрозионного метода очистки воды.

### 1.3 Анализ электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления

Для структурного и параметрического синтеза системы управления электроэрозионной водоочистной установкой необходимо разработать математическую модель процесса как объекта управления. Для решения этой задачи необходимо оценить взаимосвязь входных и выходных переменных процесса и разработать информационную модель процесса как объекта управления.

Ввиду сложности процессов, протекающих при электроэрозионной очистке воды, целесообразно представить информационную структуру процесса, как совокупность взаимосвязанных блоков (аппаратов), в которых протекает процесс:

- электроэрозионная водоочистная установка;
- бак-отстойник;
- фильтр.

На рисунке 3 представлена информационная структура электроэрозионного процесса очистки воды с выделением аппаратов, используемых в технологическом процессе.

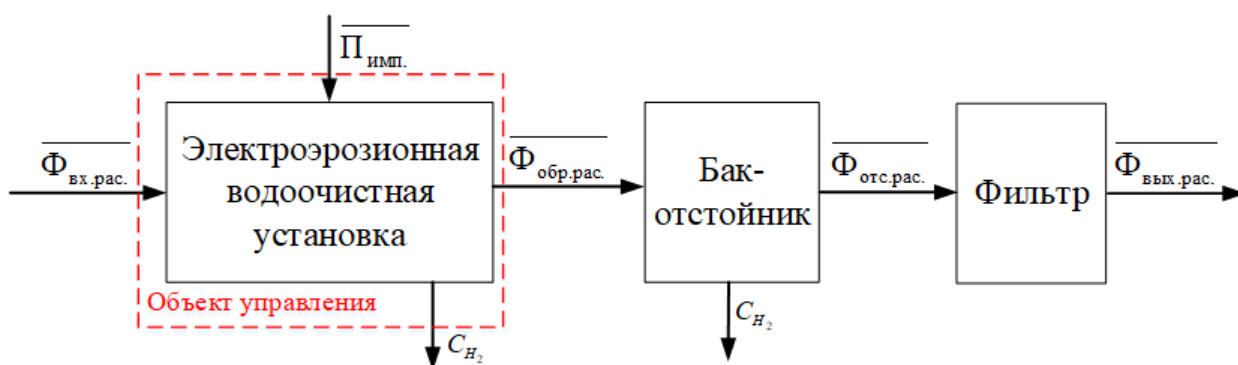


Рисунок 3 – Информационная структура установки для очистки воды с помощью электроэрозионного метода

Классификация входных и выходных переменных процесса представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация входных и выходных переменных

| Поток/вектор переменных             | Переменная                   | Наименование переменной                                                    | Описание                      |
|-------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| $\overline{\Phi}_{\text{вх.рас.}}$  | $Q_{\text{вх.рас.}}$         | Расход входного (загрязненного) водного раствора                           | Входная переменная            |
|                                     | $T_{\text{вх.рас.}}$         | Температура входного (загрязненного) водного раствора                      | Входная переменная            |
|                                     | $C_{\text{вх.рас.}}^i$       | Концентрация примесей во входном (загрязненном) водном растворе            | Входная переменная            |
| $\overline{\Pi}_{\text{имп.}}$      | $U_{\text{имп.}}$            | Напряжение подаваемых электрических импульсов                              | Входная переменная            |
|                                     | $f_{\text{имп.}}$            | Частота подаваемых электрических импульсов                                 | Входная переменная            |
|                                     | $t_{\text{имп.}}$            | Длительность подаваемых электрических импульсов                            | Входная переменная            |
| $\overline{\Phi}_{\text{обр.рас.}}$ | $Q_{\text{обр.рас.}}$        | Расход обработанного водного раствора                                      | Выходная / входная переменная |
|                                     | $T_{\text{обр.рас.}}$        | Температура обработанного водного раствора                                 | Выходная / входная переменная |
|                                     | $C_{\text{обр.рас.}}^i$      | Концентрация примесей в обработанном водном растворе                       | Выходная / входная переменная |
|                                     | $C_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}$ | Концентрация продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе | Выходная / входная переменная |
| $\overline{\Phi}_{\text{отс.рас.}}$ | $Q_{\text{отс.рас.}}$        | Расход отстаившегося водного раствора                                      | Выходная / входная переменная |

|                                     |                         |                                                                                 |                                     |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                                     | $T_{\text{отс.рас.}}$   | Температура отстоявшегося водного раствора                                      | Выходная /<br>входная<br>переменная |
|                                     | $C_{\text{отс.рас.}}^i$ | Концентрация примесей в отстоявшемся водном растворе                            | Выходная /<br>входная<br>переменная |
| $\overline{\Phi}_{\text{вых.рас.}}$ | $Q_{\text{вых.рас.}}$   | Расход выходного водного раствора                                               | Выходная<br>переменная              |
|                                     | $T_{\text{вых.рас.}}$   | Температура выходного водного раствора                                          | Выходная<br>переменная              |
|                                     | $C_{\text{вых.рас.}}^i$ | Концентрация примесей в выходном водном растворе                                | Выходная<br>переменная              |
|                                     | $C_{\text{H}_2}$        | Концентрация водорода (об. %) в воздухе помещения, в котором работает установка | Выходная<br>переменная              |

В зависимости от заданной производительности водоочистной установки (1-10 м<sup>3</sup>/ч) варьируется пропускная способность бака с исходным водным раствором, либо разрабатывается технологическая схема с параллельно работающими аппаратами малой производительности. Обработка воды в электроэрозионной водоочистной установке осуществляется относительно быстро, порядка 10 секунд. Таким образом, данная стадия не лимитирует процесс в целом. Лимитирующей стадией процесса является осаждение продуктов электроэрозии и протекание химических процессов в баке-отстойнике. Для протекания этих процессов требуется порядка 1 часа. Подробный расчёт геометрических размеров аппаратов, производительности установки, необходимой массы загружаемых металлических шариков, а также расчеты о необходимости принудительной вентиляции производственного помещения в котором расположена водоочистная установка представлены в диссертации Д.А. Войно [71]. В рамках данного диссертационного исследования рассматриваются только процессы, протекающие в баке-

реакторе электроэрозионной водоочистной установки. Информационная структура электроэрозионной водоочистной установки как объекта управления представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Информационная структура электроэрозионной водоочистной установки как объекта управления

Целью обработки воды в электроэрозионной водоочистной установке является наработка продуктов электрической эрозии металлических шариков загрузки. Образованные продукты электрической эрозии участвуя в химических процессах, которые протекают в баке-отстойнике, способствуют осаждению вредных примесей, содержащихся в обработанной воде. В связи с этим, для эффективного протекания электроэрозионного процесса очистки воды целесообразно обеспечить стабильное образование высокодисперсных продуктов электрической эрозии. Поэтому в качестве управляемой (регулируемой) переменной целесообразно выбрать концентрацию продуктов электрической эрозии ( $C_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}$ ), содержащихся в водном растворе в электроэрозионной водоочистной установке. В работе [71] определено, что при производительности водоочистной установки в  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ , концентрация продуктов электрической эрозии в обработанной водном растворе должна составлять  $0,5 \text{ г/л}$ . При увеличении производительности аппарата необходимо увеличить геометрические размеры бака-реактора водоочистной установки, увеличить массу загружаемых металлических шариков и рассчитать

оптимальную концентрацию продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе.

Количество образующихся продуктов электрической эрозии напрямую зависит от характеристик электрических импульсов, подаваемых на электроды электроэрозионной водоочистной установки. Влияние частоты ( $f_{\text{имп.}}$ ) и длительности ( $t_{\text{имп.}}$ ) подаваемых электрических импульсов на процесс электрической эрозии слоя металлических шариков в водном растворе было исследовано в работах [44-46]. В результате этих исследований было установлено, что оптимальная длительность импульсов составляет порядка 20–25 мкс. При импульсах такой длительности образуются преимущественно высокодисперсные металлические частицы. Это объясняется тем, что чем меньше длительность импульса, тем сильнее ударная волна и, как следствие, мельче капли диспергируемого металла. При увеличении длительности импульса происходит увеличение размеров эродированных частиц, что является не желательным, так как такие частицы хуже вступают в химические реакции. Из проведенных исследований следует, что оптимальная частота следования электрических импульсов составляет 700-750 Гц. Кроме того, частота ( $f_{\text{имп.}}$ ) и длительность ( $t_{\text{имп.}}$ ) подаваемых электрических импульсов зависят от характеристик и конструктивных особенностей генератора электрических импульсов, поэтому их варьирование имеет определенные технические трудности. В связи с этим, в качестве управляющей переменной целесообразно выбрать напряжение подаваемых электрических импульсов ( $U_{\text{имп.}}$ ), варьирование данной переменной не имеет технических трудностей и позволяет изменять энергию подаваемых электрических импульсов, что влияет на процесс образования продуктов электрической эрозии.

Величина напряжения подаваемых электрических импульсов ( $U_{\text{имп.}}$ ), необходимая для возникновения электрических разрядов между металлическими шариками загрузки, зависит от размеров межэлектродного пространства водоочистной установки, а также от электрической проводимости обрабатываемого водного раствора. В свою очередь

электрическая проводимость водного раствора зависит от концентрации примесей, содержащихся в обрабатываемом водном растворе [36, 72-74]. В связи с этим в качестве возмущающего воздействия на процесс электрической эрозии выделена концентрация вредных примесей, содержащихся в исходном водном растворе ( $C_{\text{вх.рас.}}^i$ ). Так как процесс обработки водного раствора в баке-реакторе протекает достаточно быстро, порядка 10 секунд, то концентрация вредных примесей, содержащихся в водном растворе, не изменяется, а химические процессы осаждения протекают на следующей стадии процесса в баке-отстойнике.

Бак-реактор электроэрозионной водоочистной установки представляет из себя проточную емкость идеального перемешивания постоянного объема. Перемешивание в аппарате осуществляется за счет того, что водный раствор с большой скоростью проходит через слой металлических шариков, которые работают как перемешивающее устройство. Расход водного раствора через электроэрозионную водоочистную установку зависит от требуемой производительности установки и определяется технологами при проектировании технологической схемы. Расходы на входе ( $Q_{\text{вх.рас.}}$ ) и выходе ( $Q_{\text{обр.рас.}}$ ) аппарата равны и контролируются с целью поддержания постоянного объема водного раствора в баке-реакторе водоочистной установки. В связи с тем, что электроэрозионной водоочистной установке предшествует ряд водоочистных аппаратов, водный раствор поступает в электроэрозионную водоочистную установку с определенной и постоянной температурой ( $T_{\text{вх.рас.}}$ ). Увеличение температуры раствора в результате электроэрозионной обработки ( $T_{\text{обр.рас.}}$ ) в установке происходит в среднем на 3-4 °С. Это изменение не оказывает влияния на протекание технологического процесса. Также в работе [71] показано, что количество водорода ( $C_{\text{H}_2}$ ), выделяющееся в результате процесса водоочистки, незначительно и принудительная вентиляция помещения не требуется.

Для разработки математической модели электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления был произведен анализ процесса, протекающего в баке-реакторе. В результате анализа были выделены две стадии протекания процесса: образование и распространение электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе; выделение продуктов электрической эрозии металлических шариков в результате электрических разрядов между ними. На основании проведенного анализа процесса была разработана информационная модель электроэрозионного процесса очистки воды как объекта моделирования, которая представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Информационная модель электроэрозионной водоочистной установки как объекта моделирования

Входными переменными разработанной информационной модели (рисунок 5) являются напряжение электрических импульсов ( $U_{\text{имп.}}, \text{В}$ ), формируемых генератором электрических импульсов и концентрация примесей, содержащихся в очищаемой воде ( $C^i_{\text{вх.рас.}}, \text{МГ/Л}$ ). Выходными переменными являются концентрация вредных примесей ( $C^i_{\text{обр.рас.}}, \text{МГ/Л}$ ), содержащихся в обработанном водном растворе и концентрация образовавшихся продуктов электрической эрозии ( $C^{\text{ЭЭО}}_{\text{Fe}}, \text{МГ/Л}$ ).

Согласно разработанной информационной модели электроэрозионного процесса как объекта моделирования выходная переменная первой стадии

является входной для следующей стадии. Так, в результате первой стадии процесса, образуется определенное количество разрядов ( $N_{\text{раз.}}$ , шт.), возникающих между металлическими шариками, загруженными в межэлектродное пространство установки. Количество образовавшихся разрядов ( $N_{\text{раз.}}$ , шт.) определяет концентрацию образующихся продуктов электрической эрозии металлических шариков ( $C_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}$ , мг/л). В свою очередь, концентрация вредных примесей, содержащихся в водном растворе, в аппарате, влияет на электрическую проводимость водного раствора ( $\gamma$ , мкСм/м), которая влияет на напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве водоочистной установки и тем самым определяют минимальное необходимое напряжение подаваемых электрических импульсов для возникновения пробоя и, как следствие, влияет на количество возникающих электрических разрядов ( $N_{\text{раз.}}$ , шт.). Электрическая проводимость водного раствора является выходной переменной второй стадии и входной переменной для первой стадии процесса, тем самым обеспечивается взаимосвязь моделей двух стадий процесса.

Стоит отметить, что бесконечное увеличение напряжения подаваемых электрических импульсов ( $U_{\text{имп.}}$ , В), не приводит к бесконечному росту количества разрядов ( $N_{\text{раз.}}$ , шт.), так как излишки энергии уходят на нагрев водного раствора, а также происходит сваривание шариков загрузки между собой, в результате чего дальнейшее протекание процесса невозможно. В связи с этим, становится актуальной задача определения оптимального значения напряжения подаваемых электрических импульсов ( $U_{\text{имп.}}$ , В). Варьирование этой переменной позволяет добиться максимального количества разрядов ( $N_{\text{раз.}}$ , шт.), при этом для контроля и изменения данной переменной ( $U_{\text{имп.}}$ , В) требуются более простые технические решения.

С целью повышения эффективности электроэрозионного метода очистки воды необходимо обеспечить стабильное образование высокодисперсных продуктов электрической эрозии из металлических шариков.

Для разработки математической модели электроэрозионного процесса очистки воды были выделены технологические параметры, оказывающие влияние на протекание процесса. Выделенные параметры процесса представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технологические параметры электроэрозионного процесса водоочистки

| Параметр             | Единицы измерения | Описание параметра                                                                     |
|----------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $t_{\text{имп.}}$    | с                 | Длительность электрических импульсов                                                   |
| $f_{\text{имп.}}$    | Гц                | Частота электрических импульсов                                                        |
| $W_{\text{ап.}}$     | мм                | Ширина межэлектродного пространства электроэрозионной водоочистной установки           |
| $L_{\text{ап.}}$     | мм                | Длина межэлектродного пространства электроэрозионной водоочистной установки            |
| $H_{\text{ап.}}$     | мм                | Высота межэлектродного пространства электроэрозионной водоочистной установки           |
| $S_{\text{эл.}}$     | мм <sup>2</sup>   | Площадь поверхности электродов используемых в электроэрозионной водоочистной установке |
| $m_{\text{загр.}}$   | г                 | Масса металлических шариков загружаемых в аппарат (масса загрузки)                     |
| $d_{\text{шар.}}$    | мм                | Диаметр металлических шариков загружаемых в аппарат                                    |
| $\rho_{\text{шар.}}$ | г/мм <sup>3</sup> | Плотность металлических шариков загружаемых в аппарат                                  |
| $c_{\text{шар.}}$    | Дж/(г·К)          | Теплоемкость металлических шариков загружаемых в аппарат                               |
| $T_{\text{плав.}}$   | К                 | Температура плавления металлических шариков загружаемых в аппарат                      |

Разрабатываемая математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды должна описывать в динамике связь между входными и выходными переменными представленными на информационной модели процесса (рисунок 5).

#### **1.4 Выводы по главе**

Глава 1 посвящена анализу электроэрозионного процесса очистки воды. Проведен анализ работ, посвященных процессу электрической эрозии и его применению в промышленности. Согласно проведенному анализу и работам [29–35, 38–42, 56, 57], был сделан вывод о том, что применение электрической эрозии для очистки промышленных стоков и природных вод является перспективным направлением. Стоит отметить, что имеется большое количество публикаций, посвященных разработке технологии очистки воды с помощью электрической эрозии слоя металлических шариков [38–40, 47, 50], а также работ, посвященных изучению физико-химических процессов, протекающих при электроэрозионной очистке воды [53–56]. Математические модели электроэрозионного процесса, представленные в литературе, не могут быть применены для описания процессов, протекающих в электроэрозионной водоочистной установке, поскольку модели, представленные в работах [58–64], рассматривают процессы только для электроэрозионных станков, предназначенных для обработки деталей, а эмпирическое выражение для определения количества эродированного металла в электроэрозионной водоочистной установке, представленное в работе [55], справедливо только для конкретного аппарата с определенным наполнением. В результате литературного обзора не обнаружено работ, посвященных разработке систем управления электроэрозионной водоочистной установкой.

Следующая часть главы посвящена описанию электроэрозионного процесса очистки воды. Отмечено что, основная цель применения электроэрозионного процесса для очистки воды заключается в том, чтобы

перевести растворенные в воде вредные примеси в нерастворимый осадок. Это достигается за счет того, что продукты эрозии металлических шариков, образовавшиеся в результате электрических разрядов, окисляются водой и растворенным в ней кислородом. В результате образуются активные гидроксиды и оксиды металла, которые эффективно сорбируют примеси, содержащиеся в воде и образуют нерастворимые соли, которые выпадают в осадок. В связи с этим, для эффективного протекания электроэрозионного процесса очистки воды необходимо обеспечить стабильное образование высокодисперсных продуктов электрической эрозии. В результате проведенного литературного обзора и анализа процесса был сделан вывод о необходимости и целесообразности разработки системы управления электроэрозионной водоочистной установкой.

На основании анализа электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления была разработана информационная структура электроэрозионной водоочистной установки как объекта управления (рисунок 4) и произведена классификация переменных. В качестве управляющей переменной выбрано напряжение подаваемых электрических импульсов ( $U_{\text{имп.}}$ ), в качестве возмущающего воздействия определена концентрация вредных примесей, содержащихся в водном растворе на входе в аппарат ( $C_{\text{вх.рас.}}^i$ ), а контролируемой переменной процесса является концентрация образующихся продуктов электрической эрозии ( $C_{\text{Fe}}^{\text{ээо}}$ ). Для синтеза системы управления электроэрозионной водоочистной установкой необходимо разработать математическую модель процесса как объекта управления. Для этого была разработана информационная модель электроэрозионной водоочистной установки как объекта моделирования (рисунок 5).

## **2 Разработка математической модели электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления**

Основное требование, предъявляемое к разрабатываемой математической модели электроэрозионного процесса очистки воды, заключается в том, что математическая модель должна адекватно описывать в динамике взаимосвязь входных и выходных переменных информационной модели электроэрозионной водоочистной установки (рисунок 5).

Фактически разрабатываемая математическая модель состоит из двух математических моделей, описывающих каждую из стадий процесса и связанных между собой:

1. математическая модель распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе;
2. математическая модель образования продуктов электрической эрозии.

При разработке математической модели были сделаны следующие допущения:

- в аппарате используются шарики одного диаметра;
- изменение диаметров шариков, в результате электрической эрозии, происходит равномерно по всему объему аппарата;
- энергия электрического импульса распределяется в равной степени между всеми разрядами, возникшими между металлическими шариками загрузки;
- распределение тепла на поверхности шариков имеет Гауссовское распределение;
- наплывом металла по краям образующихся лунок пренебрегаем, считая, что водой уносится 100 % выделившихся продуктов эрозии;
- объем лунок, образующихся в результате электрической эрозии, равен объему параболоида вращения. Обоснование этого допущения представлено в работе [75].

Распространение электрических разрядов в электроэрозионной водоочистной установке происходит между несколькими десятками или сотнями потенциальных электродов (в зависимости от количества шариков, загруженных в аппарат и от приложенного напряжения). В результате проведенного литературного обзора не было выявлено работ, посвященных моделированию данного процесса или схожего с ним. В связи с этим, возникла необходимость разработать подход, который позволит описать распространение электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе.

## **2.1 Разработка подхода моделирования процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе**

Место зарождения и траектория распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе являются стохастическим процессом. Предугадать место зарождения электрического разряда практически невозможно, также, как невозможно предугадать траекторию распространения разрядов. Однако, в ходе исследования были предприняты попытки систематизировать и описать математически эти явления.

Для моделирования процессов в такой системе не подходят классические методы моделирования с использованием дифференциальных уравнений, так как в ней невозможно использовать усредненные макровеличины, описывающие динамику системы в целом, а функции, описывающие распределение характеристик процесса по координатам межэлектродного пространства, должны иметь многочисленные разрывы. Кроме того, аппарат дифференциальных уравнений не позволяет моделировать случайный характер распределения шаров в межэлектродном пространстве. Следовательно, для моделирования распространения электрических разрядов

необходимо использовать иной подход к моделированию, принципиально отличный от дифференциальных уравнений.

Для разработки математической модели процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в электроэрозионной водоочистной установке был использован метод клеточных автоматов.

### **2.1.1 Общие сведения о методе клеточных автоматов**

Большинство сложных процессов, протекающих в природе, состоят из простых процессов, взаимосвязанных между собой и подчиняющихся элементарным законам. Результатом коллективного функционирования нескольких простых процессов является сложное поведение всего процесса [76]. Моделирование таких сложных процессов может быть выполнено с помощью объединения микропроцессов в один макропроцесс. Такой подход обеспечивает теория клеточных автоматов.

Клеточные автоматы одним из первых применил Н. Винер для моделирования процесса колебаний в сердечной мышце [77]. В дальнейшем этот подход для моделирования был использован А. Тьюрингом и Дж. фон Нейманом [78]. Метод клеточных автоматов получил популярность после выхода работ С. Уолфрама [79, 80]. Уолфрамом была сформулирована гипотеза о том, что для того, чтобы понять, что происходит в физико-химических системах, необходимо проследить шаг за шагом эволюцию системы используя вычислительный эксперимент на базе клеточного автомата. С.Я. Беркович считает, что применение клеточных автоматов для моделирования физико-химических систем и процессов является первичным и более фундаментальным, а использование дифференциальных уравнений является лишь приближением [81].

В последнее время отмечен значительный интерес исследователей к клеточным автоматам. С их помощью весьма успешно моделируются многие

сложные физико-химические процессы [82]. Клеточные автоматы позволяют рассматривать процесс как дискретную динамическую систему. Модель, на базе клеточных автоматов, разрабатывается на основе знаний о физической природе процесса. В результате разрабатываемая модель представляется как набор начальных и граничных условий, а также правил, определяющих эволюцию данного процесса [83].

Клеточным автоматом принято называть решётку, состоящую из ячеек – клеток ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), меняющих свое состояние в дискретные моменты времени по определенному закону в зависимости от того, каким было состояние самой ячейки – клетки и ее ближайших соседей по решетке в предыдущий дискретный момент времени. Набор возможных значений, которыми характеризуется состояние клетки –  $(u_1, u_2, u_3, \dots, u_k)$ . Состояние непосредственно самой клетки –  $a_i^n$  где  $i$  – координата клетки ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), « $a$ » может принимать только значения  $(u_1, u_2, u_3, \dots, u_k)$ ,  $n$  – дискретный момент времени. Также определяются правила перехода между состояниями. Состояние  $a_i^{n+1}$  клетки в следующий  $(n+1)$  момент времени зависит от состояния  $a_i^n$  клетки в данный  $(n)$  момент времени и состояний ее соседей в данный  $(n)$  момент времени. Так, для одномерного клеточного автомата закон перехода имеет вид [84]:

$$a_i^{n+1} = F(a_{i-r}^n, \dots, a_i^n, \dots, a_{i+r}^n) \quad (3)$$

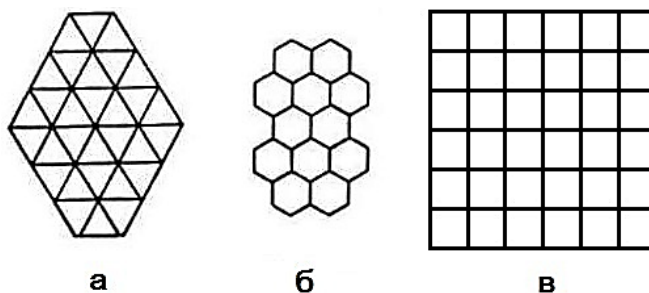
где  $r$  – размер окрестности, которую занимают соседи,  $2r$  – число соседних клеток. При таком определении клеточный автомат не обладает памятью. Клеточные автоматы с памятью можно получить, предположив, что функция  $F$  зависит, например, также от состояний ячеек в еще более ранний  $(n-1)$  момент времени. Если переходы между состояниями однозначно определены, т.е. функция  $F$  является детерминированной, то клеточный автомат, отвечающий правилу перехода (3), является детерминированным.

Однако, можно указать и такие ситуации, когда переходы имеют случайный характер. Тогда вместо функции  $F$  можно задать набор

вероятностей переходов, которые показывают, какой будет вероятность перехода  $i$ -й клетки из состояния  $a_i^n$  в  $n$ -й момент времени в состояние  $a_i^{n+1}$  в  $(n+1)$ -й момент времени, при условии, что состояния ее ближайших соседей в  $n$ -й момент времени принимали определенные значения. Подобные клеточные автоматы называют вероятностными. Для того чтобы избежать влияния уже просмотренных и возможно уже сменивших свое состояние ячеек на еще не просмотренные, все ячейки меняют свое состояние одновременно. При смене всеми ячейками системы своего состояния, система делает один шаг. После этого операция просмотра клеток и смены их состояния повторяется, то есть совершается следующий шаг.

Также существует классификация клеточных автоматов относительно их пространственной конфигурации. Выделяют следующие типы клеточных автоматов: одномерные, двумерные и трехмерные. Одномерный или линейный клеточный автомат представляется из себя решетку, состоящую из цепочки клеток, для каждой из которых, кроме крайних, имеется по два соседа. Наибольшей популярностью на практике пользуются двумерные клеточные автоматы. В двумерном или плоскостном клеточном автомате решетка представляется двумерным массивом. Свойства одномерных и двумерных клеточных автоматов во многом аналогичны [85].

Для двумерного клеточного автомата в зависимости от рассматриваемого процесса или системы используют три вида решеток: квадратную, гексагональную и треугольную (рисунок 6). Однако треугольная решетка не нашла широкого применения на практике в виду низкой информативности.



а – треугольная, б – гексагональная, в – прямоугольная

Рисунок 6 – Типы решеток клеточных автоматов

Каждая клетка решетки характеризуется пространственными координатами, для двумерного клеточного автомата  $i$  и  $j$ , для трехмерного клеточного автомата  $i$ ,  $j$  и  $k$ . Кроме того, для каждой клетки решетки рассматривается некая окрестность соседних клеток, влияющих на параметры и состояние самой клетки.

Таким образом, для моделирования какого-либо процесса с помощью метода клеточных автоматов необходимо следующее:

- определить наиболее подходящий тип клеточного автомата (детерминированный или вероятностный), в зависимости от моделируемого процесса;
- выбрать пространственную конфигурацию и тип решетки автомата;
- задать набор возможных значений, характеризующих состояние клеток автомата;
- определить правила эволюции состояний клеток автомата и их параметров во времени;
- сформулировать начальные условия.

Совместно с положениями теории клеточных автоматов требуется учитывать основные законы исследуемого и моделируемого процесса или явления.

### **2.1.2 Применение вероятностных клеточных автоматов для моделирования процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе**

Как было отмечено ранее, процесс распространения электрических разрядов между металлическими шариками в межэлектродном пространстве электроэрозионной водоочистной установки является стохастическим процессом. В виду этого целесообразно использовать метод вероятностных клеточных автоматов.

Для использования вероятностных клеточных автоматов необходимо выбрать пространственную конфигурацию и тип решетки автомата, учитывая особенности моделируемого процесса.

Металлические шарики, заполняющие межэлектродное пространство в аппарате, уложены слоем определенной высоты (рисунок 2), в зависимости от массы загруженных шариков и размеров аппарата. Как видно на рисунке 7 один определенный шарик (выделен цветом) в аппарате, соседствует с 6 шариками из слоя в котором он находится и по 3 шарика окружают его с верху и снизу. Таким образом, один шарик в аппарате может иметь до 12 соседей.

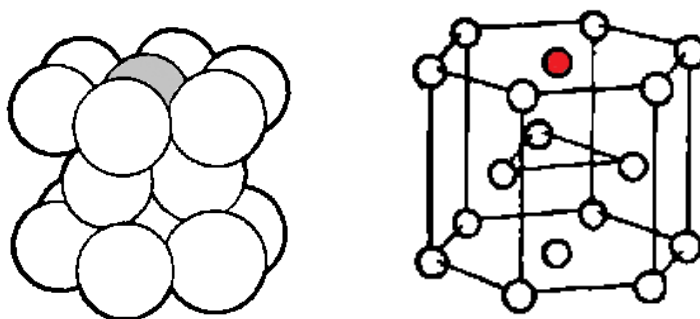


Рисунок 7 – Расположение шариков в аппарате

Если рассмотреть каждый слой шариков отдельно, то отчетливо видно, что распределение шариков удовлетворяет гексагональной решетке клеточных автоматов, представленной на рисунке 6. В каждой ячейке гексагональной решетки (рисунок 8) располагается один металлический шарик.

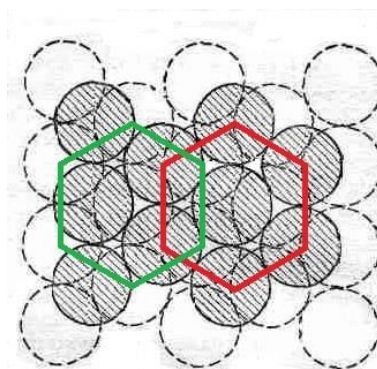
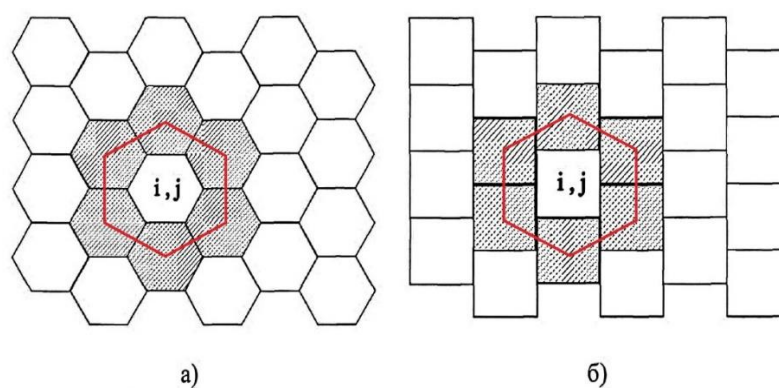


Рисунок 8 – Гексагональное расположение металлических шариков

Для моделирования процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе целесообразно использовать гексагональную решетку вероятностных клеточных автоматов. При этом, в ходе составления правил состояний клеток, учитывается, что разряд может переходить с одного слоя шариков на другой. Для однозначного задания координат клеток и возможности моделирования, гексагональная решетка претерпевает определенные преобразования (рисунок 9).



а) исходная гексагональная решетка; б) расчетная решетка, реализуемая в ЭВМ

Рисунок 9 – Преобразование гексагональной решетки клеточного автомата

Клетки решетки в процессе моделирования могут принимать два значения. Первое значение говорит о том, что разряд прошел через шарик (клетку), второе значение говорит о том, что шарик (клетка) не был подвержен воздействию электрического разряда.

В предлагаемом подходе к моделированию процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе предлагается представить межэлектродное пространство, заполненное металлическими шариками и водным раствором, как последовательно-параллельную цепь из резисторов (рисунок 10).

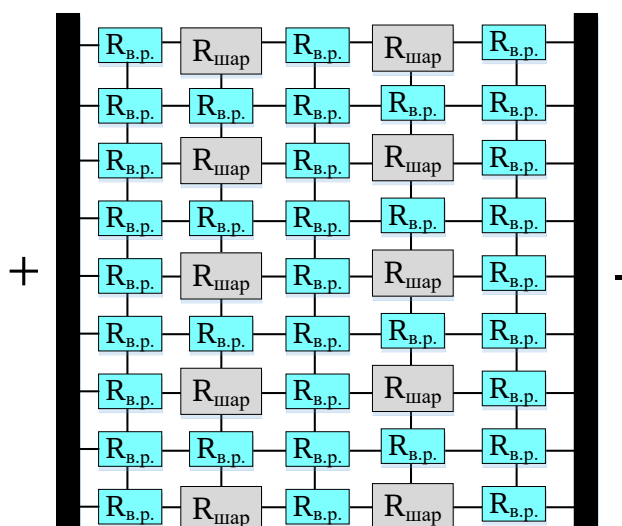


Рисунок 10 – Резистивная схема замещения

Сопротивлением обладают не только шарики ( $R_{шар}$ ), загруженные в аппарат, но и водный раствор ( $R_{в.р.}$ ). Как бы плотно шарики не прилегали друг к другу, между ними существует тонкая пленка водного раствора, которая имеет свое сопротивление. Процесс возникновения электрических разрядов между шариками определяется толщиной этой водяной пленки, так как от этого зависит сопротивление водного раствора между двумя шариками и, как следствие, величина необходимого напряжения для пробоя данной пленки. Также сопротивление водяной пленки зависит от загрязненности водного раствора, чем она выше, тем больше в воде ионов и проводящих примесей.

Свойство растворов проводить электрический ток определяется такой величиной, как удельная электропроводность водного раствора, это величина обратная сопротивлению и прямо пропорционально зависящая от концентрации примесей в водном растворе. Чем больше электропроводность раствора, тем меньшее напряжение необходимо приложить для возникновения пробоя [36, 72-74].

Толщина пленки водного раствора между шариками загрузки, зависит от расположения шариков в аппарате. Шарики располагаются в аппарате произвольным образом. От загрузки к загрузке и, более того, в процессе прохождения электрических разрядов, сопровождающихся ударной волной,

положение центров шариков смещается от начального положения случайным образом. То есть сопротивление элементов предложенной цепи (рисунок 10), после каждого импульса принимает произвольные значения, точно определить которые невозможно. Некоторые из шариков более плотно прижаты друг к другу, некоторые наоборот. Невооруженным глазом невозможно определить это. Соответственно, чем плотнее шарики прижаты друг к другу, тем меньше толщина плёнки водного раствора между ними. Если рассматривать гексагональную решетку расположения шариков в одном слое, то шарики, находясь в своих ячейках, являются смещенными в какую-то сторону. Кроме того, возникновение разрядов на границе потенциального электрода и шариков также является вероятностным процессом. И также зависит от расположения шариков в аппарате. В месте, где шарики более тесно прилегают к электроду, возникает первый разряд. Вывести математическую зависимость или закон описывающий расположение шариков в аппарате не представляется возможным, так как это вероятностный процесс. Поэтому, используя вероятностные клеточные автоматы задается положение шариков в ячейках решетки [86, 87].

Фактически, ячейками вероятностного клеточного автомата являются металлические шарики, загруженные в межэлектродное пространство аппарата. Набором информации в ячейках, определяющем динамику процесса, являются координаты металлических шаров и напряженность электрического поля в этих координатах. Каждая шарик-ячейка определена в декартовой системе координат, то есть несет в себе 3 координаты: по ширине, высоте и длине межэлектродного пространства. Эти координаты определяются случайным образом перед каждым электрическим импульсом, имитируя перераспределение шаров в межэлектродном пространстве под действием ударной волны. Напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве является неоднородной. Её распределение по объему межэлектродного пространства зависит от геометрии аппарата и напряжения

импульсов, подаваемых на электроды электроэрозионной водоочистной установки.

Законы эволюции клеточного автомата следуют из предложенной ранее резистивной схемы замещения. Разряд возникает между теми шариками, между которыми существует водяная пленка наименьшей толщины и, как следствие, наименьшего сопротивления. При этом, для возникновения электрического разряда между соседними шариками, напряженность электрического поля между ними должна быть выше некоторого порогового значения.

Аналогичным образом определяется, в каких точках плоскости электрода инициируется электрический разряд. Из всех шариков приэлектродного ряда разряд инициируется на тех шариках, которые находятся ближе всего к плоскости электрода, то есть в местах наименьшего сопротивления водной прослойки между шариком и плоскостью электрода. Количество шариков, на которых инициируется электрических разряд, зависит от напряжения подаваемых электрических импульсов и величины межэлектродного расстояния.

Вероятностный характер распространения электрических разрядов между шариками является следствием случайности расположения шариков в межэлектродном пространстве, а также результатом изменения положения шариков под действием электрических разрядов. При этом шарики не перемещаются произвольным образом по объему аппарата, а претерпевают смещения малой величины относительно своих положений в четкой структуре гексагональной решетки. Величина этих смещений определяется плотностью расположения шариков в слое загрузки. То есть центр шариков после каждого импульса занимает новое произвольное положение в некоторой ограниченной зоне из некоторого числа возможных положений, как показано на рисунке 11.

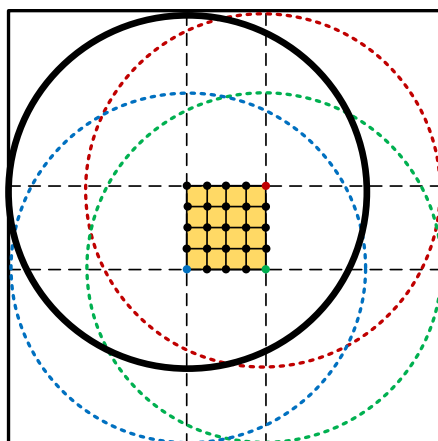


Рисунок 11 – Возможные положения шарика в ячейке клеточного автомата

Таким образом, предложен новый подход для моделирования процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе. Модель реализуется на базе вероятностных клеточных автоматов, свойства и структура которых определены резистивной схемой замещения загрузки в межэлектродном пространстве (рисунок 10). Вероятностный характер клеточных автоматов является следствием случайного расположения шариков загрузки в межэлектродном пространстве.

Предложенный подход также можно использовать для моделирования процессов получения наноразмерных частиц металлов с помощью электроэрозионного (электроискрового) метода. Подробное описание электроимпульсного метода получения наноразмерных частиц серебра представлено в работе [88], получение наноразмерных частиц оксида и пероксида цинка электроискровым методом описано в публикации [89], получение наноразмерных порошков золота описывается в статье [90], а получение наноразмерных порошков оксигидроксидов алюминия предложено в работе [91].

Следующим шагом является разработка непосредственно самой математической модели процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе с описанием всех детерминированных и вероятностных зависимостей.

## 2.2 Разработка математической модели процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе

Количество максимально возможных разрядов между шариками зависит от размеров аппарата, диаметра загружаемых шариков, напряжение подаваемых электрических импульсов, а также от массы загруженных шариков. Геометрические размеры аппарата и масса загружаемых шариков определяются при разработке технологической схемы водоочистки и исходя из необходимой производительности водоочистной установки. Пример таких расчетов представлен в работе [71].

Базой модели является гексагональная трехмерная решетка, равномерно разбивающая межэлектродное пространство на ячейки клеточного автомата. Для работы с гексагональной решеткой необходимо выполнить преобразование гексагональной решетки в прямоугольную, как продемонстрировано на рисунке 12.

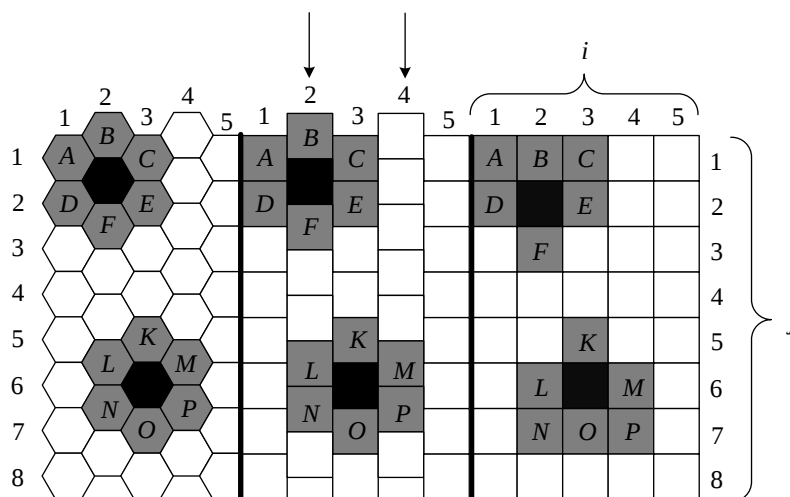


Рисунок 12 – Преобразование гексагональной решетки

Смещением четных столбцов прямоугольной решетки вниз на пол ячейки достигается эффект гексагональной структуры: шесть ячеек-соседей вместо восьми и их равноудаленность от рассматриваемой ячейки, что позволяет добиться большей изотропности. Далее происходит моделирование процесса

уже на прямоугольной решетке с учетом изменения окружения рассматриваемой ячейки, заключающегося в числе соседей и их индексах, отличных для четных и нечетных столбцов. Это объясняется необходимостью сохранения соседства по одной линии двух клеток из разных столбцов:

- для четных:  $A(i-1)(j-1)$ ,  $B(i-1)(j)$ ,  $C(i-1)(j+1)$ ,  $D(i)(j-1)$ ,  $E(i)(j+1)$ ,  $F(i+1)(j)$ ;
- для нечетных:  $K(i-1)(j)$ ,  $L(i)(j-1)$ ,  $M(i)(j+1)$ ,  $N(i+1)(j-1)$ ,  $O(i+1)(j)$ ,  $P(i+1)(j+1)$ .

Такое преобразование выполняется для каждого слоя металлической загрузки, что позволяет реализовать объемную гексагональную решетку, максимально приближенную к реальной структуре расположения шариков в межэлектродном пространстве установки (рисунок 13).

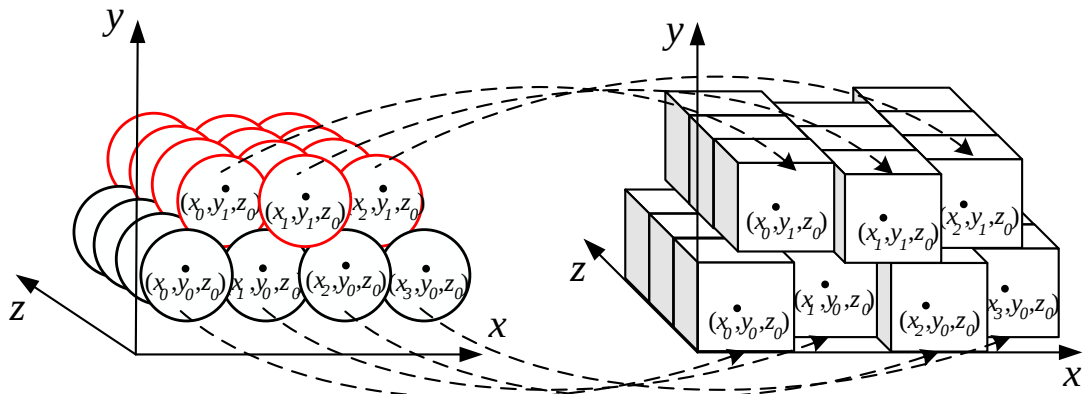


Рисунок 13 – Расположение слоев шариков, загруженных в аппарат, относительно друг друга

Изначально рассчитывается количество загруженных шариков в зависимости от массы загрузки:

$$N_{all} = \frac{3 \cdot m_{загр}}{2 \cdot \rho_{шар} \cdot \pi \cdot d_{шар}^3}, \quad (4)$$

где  $d_{шар}$  – диаметр шариков металлической загрузки (мм);  $m_{загр}$  – масса металлических шариков, загруженных в аппарат (кг);  $\rho_{шар}$  – плотность металлических шариков (кг/м<sup>3</sup>).

Размер ячеек полученной решетки рассчитывается с учетом размеров шариков и геометрии аппарата: определяется количество шариков  $N_w, N_h, N_l$ , которые могут поместиться в аппарат с учетом водных прослоек:

$$N_w = \frac{W_{\text{ап}} - A}{d_{\text{шар}} + A}; \quad N_h = \frac{H_{\text{ап}} - A}{d_{\text{шар}} + A}; \quad N_l = \frac{L_{\text{ап}} - A}{d_{\text{шар}} + A}. \quad (5)$$

Далее делением габаритных размеров на полученные значения  $N_w, N_h, N_l$  определяются размеры ячейки по трем пространственным координатам:

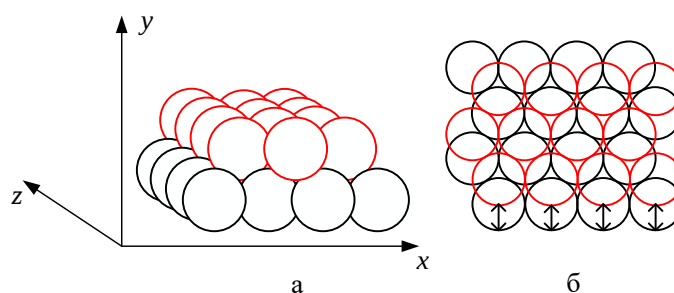
$$S_w = \frac{W_{\text{ап}}}{N_w}, \quad S_h = \frac{H_{\text{ап}}}{N_h}, \quad S_l = \frac{L_{\text{ап}}}{N_l}, \quad (6)$$

где  $N_w, N_h, N_l$  – количество шариков по ширине, высоте и длине аппарата соответственно (шт);  $H_{\text{ап}}, W_{\text{ап}}, L_{\text{ап}}$  – габаритные размеры внутреннего объема аппарата по ширине, высоте и длине аппарата, соответственно (мм);  $A$  – толщина водной прослойки (мм);  $d_{\text{шар}}$  – диаметр шариков металлической загрузки (мм);  $S_w, S_h, S_l$  – размеры ячейки автомата по ширине, высоте и длине аппарата, соответственно (мм).

Затем рассчитывается количество слоев шариков, которые располагаются по высоте аппарата в зависимости от массы загрузки:

$$N_{h_{\text{загр}}} = \frac{N_{\text{all}}}{N_w \cdot N_l}. \quad (7)$$

После определения параметров решетки необходимо рассчитать координаты точек, являющихся условными центрами шариков загрузки. На рисунке 14 продемонстрировано, как расположены относительно друг друга слои в загрузке.



а) общий вид, б) вид сверху

Рисунок 14 – Первый (черный) и второй (красный) слои загрузки

Стоит отметить характерные особенности расположения шариков в гексагональной решетке (рисунок 14а). Координаты четного слоя смещены по длине (ось  $z$ ) относительно нечетного на расстояние равное половине длины ячейки  $Sl$ . Координаты центров шариков в нечетных рядах одного слоя смещены по ширине (ось  $x$ ) на величину, равную половине ширины ячейки  $Sw$ . Координата по длине (ось  $z$ ) каждого последующего ряда увеличивается на величину, равную высоте правильного треугольника с ребром, равным длине ячейки  $Sl$ . Из рисунка 14а также видно, что высота каждого последующего слоя отличается от предыдущего на постоянное значение. Это значение является высотой правильного тетраэдра, образуемого шариками. Ниже представлены формулы расчета координат условных центров шаров:

$$\begin{aligned} x_{i,j,k}^0 &= qx + \frac{d_{\text{шар}}}{2} + Sw \cdot k, \\ y_{i,j,k}^0 &= \frac{d_{\text{шар}}}{2} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot Sh \cdot j, \\ z_{i,j,k}^0 &= qz + \frac{d_{\text{шар}}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot Sl \cdot i, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $x_{i,j,k}^0, y_{i,j,k}^0, z_{i,j,k}^0$  – координаты центра шара по ширине, высоте и длине, соответственно (мм);  $k, j, i$  – порядковые номера (индексы) шара по ширине, высоте и длине, соответственно;  $qx, qz$  – смещения, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} qx &= \begin{cases} \frac{Sw}{2}, k = 1, 3, 5... \\ 0, k = 2, 4, 6... \end{cases}, \\ qz &= \begin{cases} \frac{Sl}{2}, j = 2, 4, 6... \\ 0, j = 1, 3, 5... \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

Далее необходимо перейти от детерминированных клеточных автоматов к вероятностным. Этот переход осуществляется за счет того, что диаметр шарика загрузки меньше любого из размеров ячейки. Поэтому центр шарика

может занять любое положение в некотором объеме, образуемом крайними положениями центра шарика, когда он своей поверхностью касается двух любых плоскостей ячейки. На рисунке 15 на примере двумерной решетки изображена схема размещения центра шарика диаметром  $R$ , в ячейке размерами  $Sw \times Sh$ . Красной точкой на рисунке 15 обозначено место центра шарика в строго определенной гексагональной решетке. Крайние положения шарика в углах решетки образуют зону (выделена желтым цветом), на которой изображены возможные положения центра шарика. От их количества зависит точность модели – чем их больше, тем ближе схема модели к реальному расположению шарика в загрузке аппарата [13].

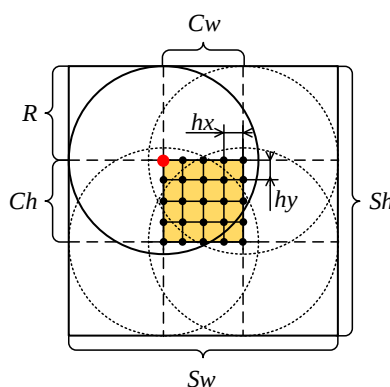


Рисунок 15 – Схема размещения шарика в ячейке клеточного автомата

Размеры зоны возможного положения центра шарика рассчитываются по уравнениям:

$$\begin{aligned} Cw &= Sw - d_{\text{шар}}, \\ Ch &= Sh - d_{\text{шар}}, \\ Cl &= Sl - d_{\text{шар}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $Cw, Ch, Cl$  – размеры зоны возможного положения центра шарика по ширине, высоте и длине аппарата соответственно (мм).

Координаты шарика в этой зоне – по уравнениям:

$$\begin{aligned}
\Delta x_{i,j,k} &= \frac{V}{\max V} \cdot Cw, \\
\Delta y_{i,j,k} &= \frac{V}{\max V} \cdot Ch, \\
\Delta z_{i,j,k} &= \frac{V}{\max V} \cdot Cl,
\end{aligned} \tag{11}$$

где  $\Delta x_{i,j,k}, \Delta y_{i,j,k}, \Delta z_{i,j,k}$  – координаты центра шара по ширине, высоте и длине в зоне возможного положения центра шарика, соответственно (мм);  $\max V$  – число возможных позиций шара по координате;  $V$  – случайное число от 1 до  $\max V$ .

Сумма координаты шарика в гексагональной решетке и его координаты в зоне возможного положения центра шарика определяет конечную координату шарика в вероятностном клеточном автомате:

$$\begin{aligned}
x_{i,j,k} &= x_{i,j,k}^0 + \Delta x_{i,j,k}, \\
y_{i,j,k} &= y_{i,j,k}^0 + \Delta y_{i,j,k}, \\
z_{i,j,k} &= z_{i,j,k}^0 + \Delta z_{i,j,k}.
\end{aligned} \tag{12}$$

По имеющимся координатам центров шариков по длине  $z_{i,j,k}$  определяется напряженность электрического поля для каждого шарика:

$$E_{i,j,k} = \frac{U_{\text{имп}}}{A} \left( 1 - e^{\frac{-31,93 \cdot L_{\text{м.э.}}^{0,0204}}{z_{i,j,k}}} \right), \tag{13}$$

где  $U_{\text{имп}}$  – напряжение импульсов (В);  $L_{\text{м.э.}}$  – длина межэлектродного пространства (мм);  $z_{i,j,k}$  – координата центра шара по длине аппарата (мм);  $A$  – толщина водной прослойки между шариками (мм).

Распределение напряженности определяет направление электрического разряда в нагрузке, а также максимальную длину разрядных «дорожек» в межэлектродном пространстве: разряд между шариками происходит только при выполнении условия:

$$E_{i,j,k} > E_{кр} = \frac{M}{t_{имп}^3 \cdot S_{эл}^{10}} \cdot e^{-a \cdot \gamma}, \quad (14)$$

где  $E_{кр}$  – напряженность пробоя воды, определяемая по эмпирической формуле Мартина (В/мм);  $t_{имп}$  – длительность импульсов напряжения (с);  $S_{эл}$  – площадь электродов (мм<sup>2</sup>);  $M$  – постоянная, равная 0,6 МВ/см для воды;  $\gamma$  – электрическая проводимость водного раствора (мкСм/м);  $a = 0,001623$  – эмпирический коэффициент.

Для моделирования процесса распространения электрических разрядов по загрузке межэлектродного пространства необходимо определить, в каких точках потенциального электрода формируется разряд. Для этого определяются шарики приэлектродного слоя, попадающие в зону пробоя  $D$ , ширина которой определяется по эмпирической формуле:

$$D = Cl \cdot \frac{0,7225 \cdot e^{\frac{0,2909 \cdot U_{имп}}{L_{м.э.}}}}{Nw}. \quad (15)$$

Шарики, с которых начинается распространение электрических разрядов, формируют начальные условия работы вероятностных клеточных автоматов. Дальнейший путь распространения разряда по загрузке определяется в соответствии с законами эволюции системы [11]:

- разряд может развиваться только в направлении уменьшения напряженности электрического поля:

$$E_{i,j,k}^{n+1} > E_{i,j,k}^n.$$

- разряд проходит только через те клетки, напряженность поля в которых больше критической напряженности  $E_{кр}$ :

$$E_{i,j,k}^{n+1} > E_{кр}.$$

- разряд переходит на ближайший шар в окружении.

В результате работы вероятностных клеточных автоматов по перечисленным законам эволюции, под действием одного электрического импульса формируются траектории прохождения электрических разрядов по

загрузке аппарата от потенциального электрода до заземленного. По формуле (16) рассчитывается количество разрядов, вызванных одним электрическим импульсом.

$$N_{\text{раз.}} = b + v_0, \quad (16)$$

где  $N_{\text{раз.}}$  – количество всех разрядов в межэлектродном пространстве (шт.);  $v_0$  – количество шариков приэлектродного слоя, через которые произошел пробой от потенциального электрода (шт.);  $b$  – число шариков в аппарате, через которые произошел пробой (шт.).

В зависимости от числа разрядов (16), возникших между металлическими шариками загрузки в межэлектродном пространстве водоочистной установки, определяется масса металла, эродированного с поверхности шариков. В зависимости от массы образовавшихся продуктов электрической эрозии и объема бака-реактора водоочистной установки определяется концентрация продуктов эрозии в аппарате.

Информационная структура математической модели процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе, на базе вероятностных клеточных автоматов представлена на рисунке 16. На представленной схеме выделены входные и выходные переменные, а также параметры математической модели.

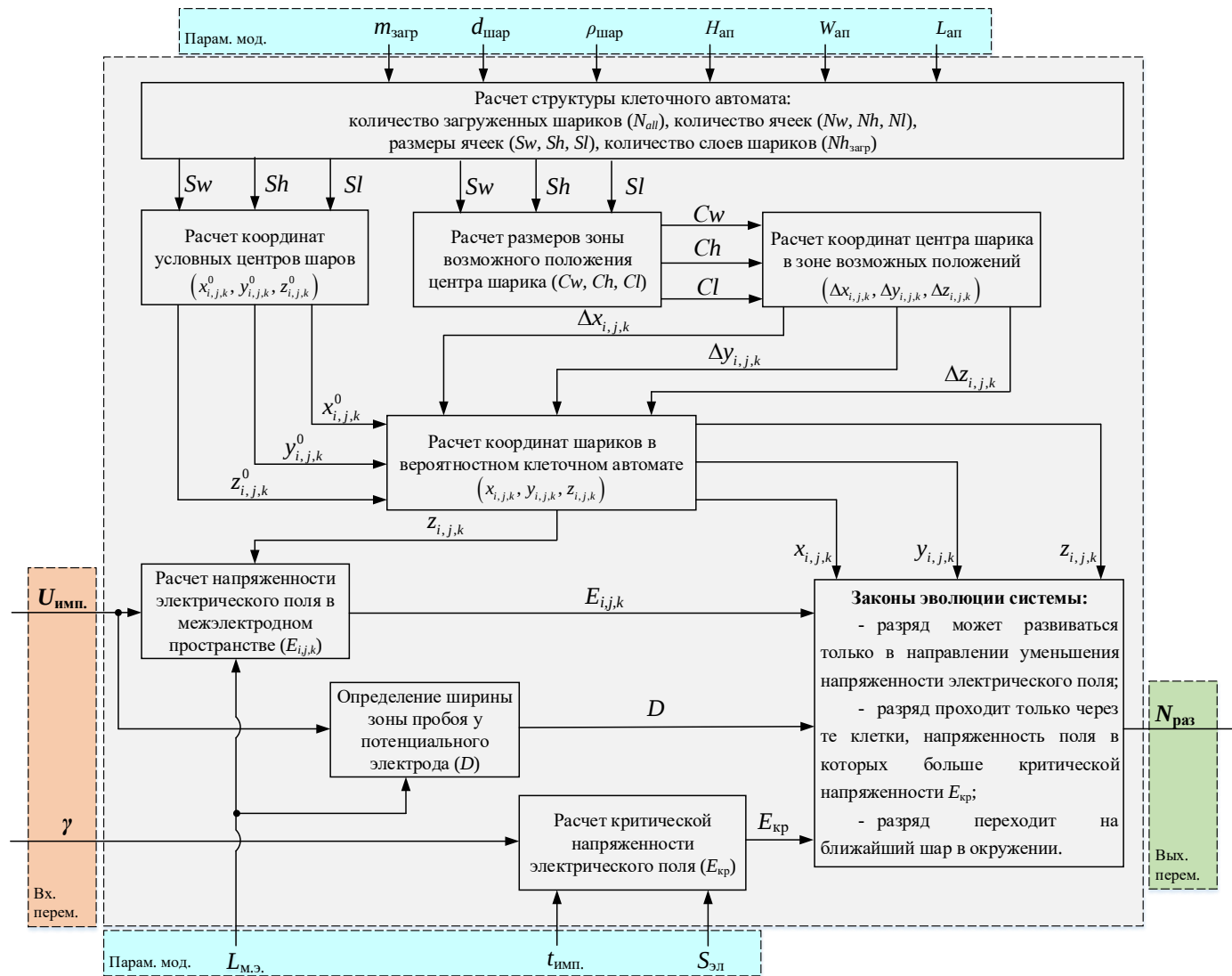


Рисунок 16 – Информационная структура математической модели процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе

### 2.3 Разработка математической модели образования продуктов электрической эрозии металлических шариков в водном растворе

Для определения концентрации продуктов электрической эрозии в аппарате необходимо рассмотреть механизм их образования. Так как длительность электрических разрядов не велика, то выделяющееся тепло не успевает распространиться в глубь металлического шарика. Но этого тепла достаточно, чтобы разогреть и расплавить небольшое количество металла с поверхности шарика. В результате образуются продукты эрозии, а на металлических шариках образуются лунки. Объем образовавшихся лунок пропорционален массе образовавшихся продуктов электроэрозии. Таким образом, для определения концентрации продуктов эрозии в обрабатываемой воде, необходимо определить параметры образующихся лунок и оценить количество образовавшихся лунок.

Схема образования лунки на поверхности металлического шара, в результате электрической эрозии, представлена на рисунке 17 [9].

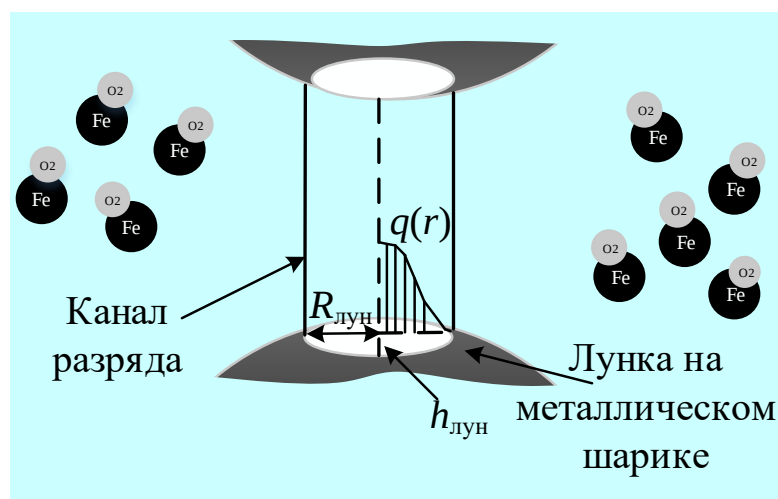


Рисунок 17 – Схема образования лунки на поверхности металлического шарика

Основываясь на допущение, принятое ранее и обоснованное в работе [75], объем образующихся лунок равен объему параболоида вращения и определяется по следующему выражению:

$$V_{\text{лун}} = 0,5 \cdot \pi \cdot R_{\text{лун}}^2 \cdot h_{\text{лун}}, \quad (17)$$

где  $R_{\text{лун}}$  – радиус лунок, образующихся на поверхности металлических шариков (мм);  $h_{\text{лун}}$  – глубина лунок, образующихся на поверхности металлических шариков (мм).

Величина радиуса образующихся эрозионных лунок зависит от радиуса разрядного канала. Во многих зарубежных работах [59, 92], опубликованных в последнее время и посвященных моделированию электроэрозионной обработке металлических изделий, с помощью электроэрозионных станков, используется эмпирическое выражение для определения радиуса образующихся лунок. В предлагаемом выражении радиус лунки является функцией от тока и длительности электрического импульса.

Однако, данное выражение не подходит для расчета радиуса лунок, образующихся на поверхности металлических шариков, так как не учитывает размеры металлических шариков загрузки. Для определения эмпирической зависимости радиуса лунок от размеров шариков загрузки и энергии подаваемых электрических импульсов, была проведена серия экспериментов. Для этого была разработана экспериментальная установка, предназначенная для электроэрозионной обработки металлических шариков в водном растворе. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 18. В состав экспериментальной установки входит генератор импульсов (ГИ) и герметичная трубка, заполненная водным раствором и металлическими шариками. С обоих концов трубки подведены электроды. С помощью диодного моста (VD1-VD4) происходит преобразование сетевого напряжения и заряд конденсаторной батареи (C1). Резисторы R1 и R2 предназначены для ограничения тока. Тиристор VS1 предназначен для управления зарядом конденсаторной батареи, а тиристор VS2 предназначен для управления разрядом конденсаторной батареи. Катушка индуктивности L1 предназначена для ограничения скорости нарастания обратных токов и сохранения работоспособности тиристора VS2. Данная схема генератора

электрических импульсов позволяет формировать одиночные импульсы определенной амплитуды.

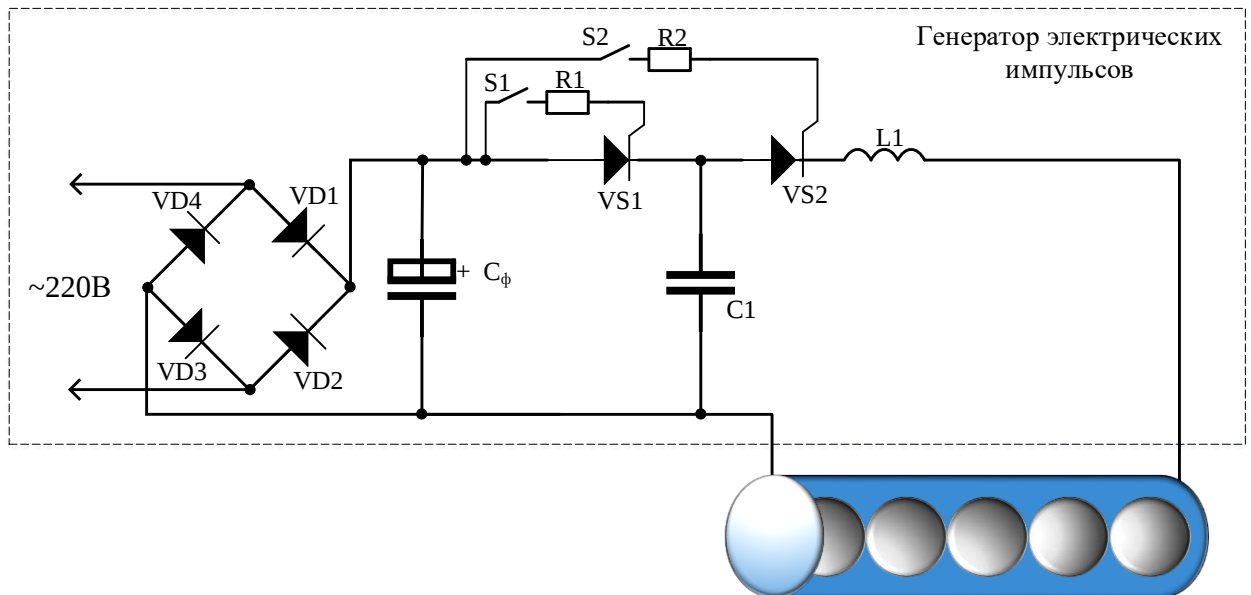


Рисунок 18 – Схема экспериментальной установки

Получаемая эмпирическая зависимость представляет из себя функциональную зависимость радиуса (диаметра) образующихся эрозионных лунок в зависимости от диаметра шариков загрузки и энергии подаваемых электрических импульсов. Таким образом, одним из факторов эксперимента является диаметр шариков загрузки, а вторым – энергия подаваемых электрических импульсов. Однако, исходя из требований управляемости и однозначности, предъявляемых к факторам эксперимента, использование энергии подаваемых электрических импульсов в качестве фактора эксперимента не представляется возможным, в связи с отсутствием возможности точного измерения и управления данным параметром. В связи с этим, вторым фактором для проводимого эксперимента было выбрано напряжение подаваемых электрических импульсов, которое определяет энергию электрических импульсов, согласно выражению:

$$q_{\text{имп}} = U_{\text{имп}} \cdot I_{\text{имп}} \cdot t_{\text{имп}}, \quad (18)$$

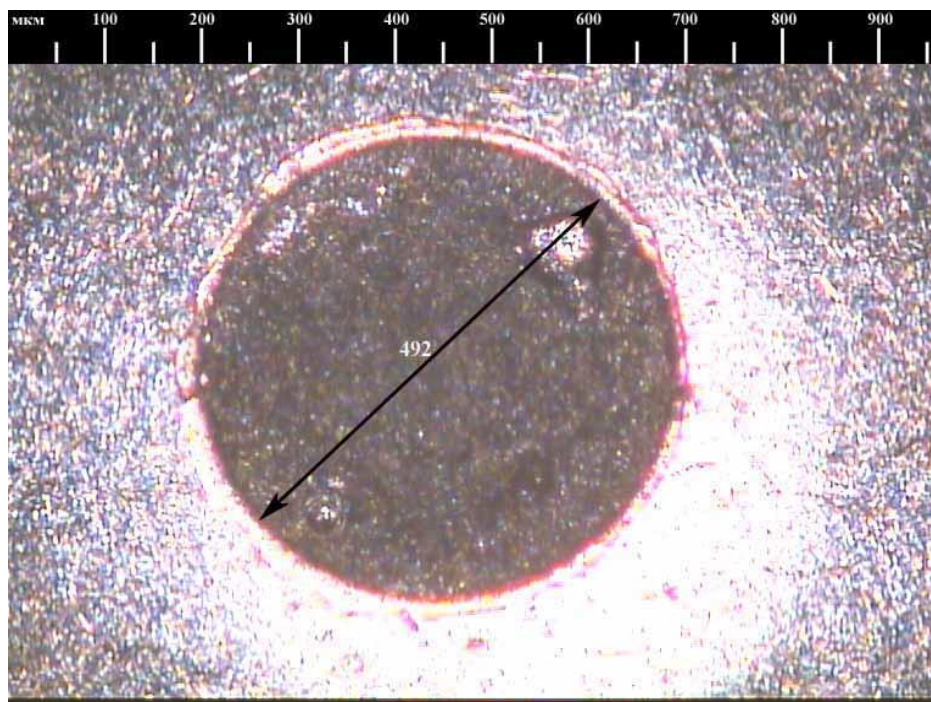
где  $U_{\text{имп}}$  – напряжение импульса (В);  $I_{\text{имп}}$  – значение силы тока импульса (А);  $t_{\text{имп}}$  – длительность импульса (с).

Для эксперимента использовались металлические шарики разных диаметров ( $d_{\text{шар}} = 4 \text{ мм}$ ,  $d_{\text{шар}} = 6 \text{ мм}$ ,  $d_{\text{шар}} = 8 \text{ мм}$ ) и подавались электрические импульсы разной амплитуды. Для проведения исследований был составлен план эксперимента (таблица 3).

Таблица 3 – План эксперимента

| № эксперимента | $d_{\text{шар}}$ , мм | Количество шариков, шт | $U_{\text{имп}}$ , В |
|----------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 1              | 8                     | 10                     | 200                  |
| 2              | 8                     | 10                     | 175                  |
| 3              | 8                     | 10                     | 150                  |
| 4              | 8                     | 10                     | 125                  |
| 5              | 8                     | 10                     | 100                  |
| 6              | 8                     | 10                     | 75                   |
| 7              | 8                     | 10                     | 50                   |
| 8              | 6                     | 10                     | 200                  |
| 9              | 6                     | 10                     | 175                  |
| 10             | 6                     | 10                     | 150                  |
| 11             | 6                     | 10                     | 125                  |
| 12             | 6                     | 10                     | 100                  |
| 13             | 6                     | 10                     | 75                   |
| 14             | 6                     | 10                     | 50                   |
| 15             | 4                     | 10                     | 200                  |
| 16             | 4                     | 10                     | 175                  |
| 17             | 4                     | 10                     | 150                  |
| 18             | 4                     | 10                     | 125                  |
| 19             | 4                     | 10                     | 100                  |
| 20             | 4                     | 10                     | 75                   |
| 21             | 4                     | 10                     | 50                   |

Для расчета энергии импульса по выражению (18) в ходе экспериментов производилось фиксирование значений тока подаваемых электрических импульсов. В результате пропускания электрического импульса через металлические шарики были отчетливо видны разряды между ними, сопровождаемые хлопком, а также происходило выделение водорода вследствие электролиза воды. На шариках образовались эрозионные лунки разных размеров, в зависимости от напряжения подаваемого импульса и диаметра шариков. Для анализа полученных результатов использовался сканирующий (растровый) электронный микроскоп JEOL JSM-7500FA. В результате анализа были измерены диаметры всех образовавшихся лунок на шариках. Примеры образовавшихся лунок представлены на рисунке 19. Кроме того, используя трехмерный бесконтактный профилометр Micro Measure 3D Station были построены формы образовавшихся лунок и измерена глубина этих лунок. Форма эрозионной лунки, построенная с помощью профилометра, представлена на рисунке 20.



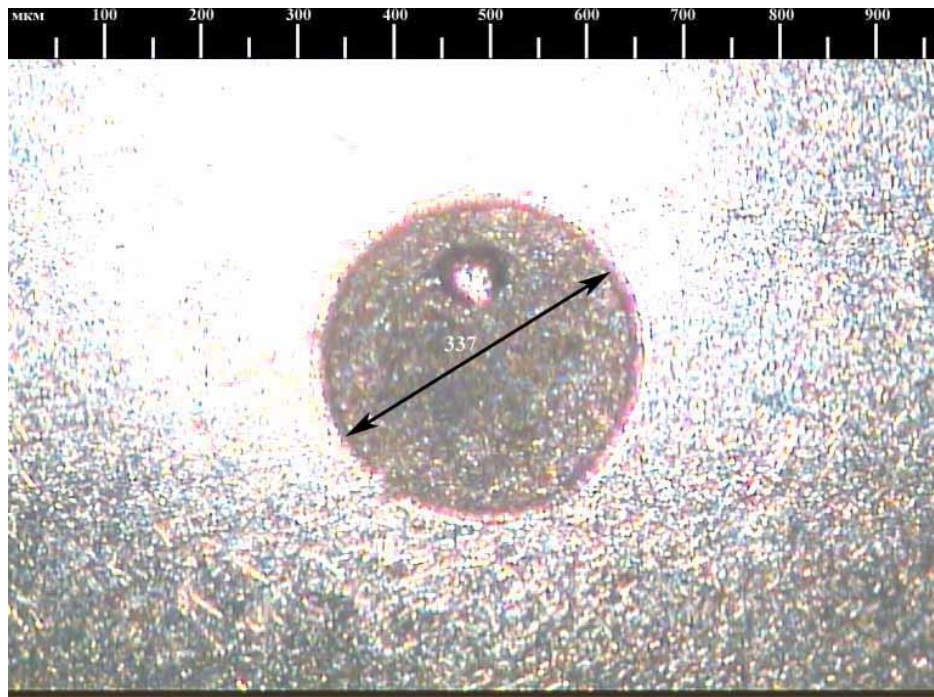


Рисунок 19 – Эрозионные лунки образовавшиеся на шариках с  $d_{\text{шар}} = 8$  мм, количество загруженных шариков 10 шт и параметрами электрических импульсов  $U_{\text{имп}} = 175$  В и  $U_{\text{имп}} = 100$  В соответственно

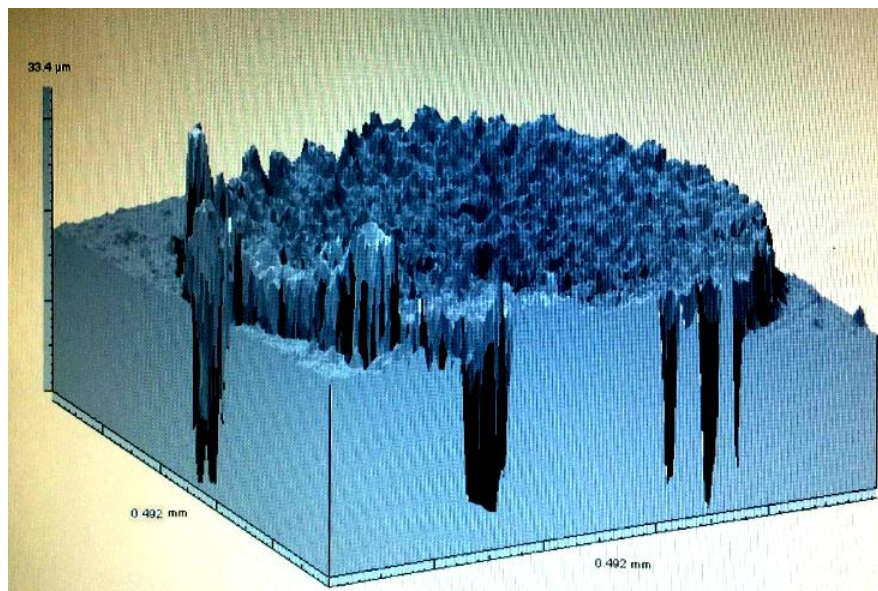


Рисунок 20 – Форма образовавшейся эрозионной лунки на шарике с  $d_{\text{шар}} = 8$  мм, при 10 шт загруженных шариков и  $U_{\text{имп}} = 175$  В

Согласно работе [93], считается, что энергия электрического импульса равномерно распределяется между возникающими разрядами (вспышками).

Это подтверждают и полученные экспериментальные данные, так как при воздействии на шарики одиночного электрического импульса, на них образуются эрозионные лунки одинакового диаметра. Таким образом, энергия разрядного канала, возникающего между шариками загрузки, рассчитывается с помощью выражения:

$$q_{\text{кан}} = \frac{q_{\text{имп}}}{N_{\text{раз}}}, \quad (19)$$

где  $q_{\text{имп}}$  – энергия электрического импульса, подаваемого на электроды установки (Дж);  $N_{\text{раз}}$  – количество разрядов, возникающих между шариками загрузки (шт.).

В результате произведенных расчетов с помощью выражений (18) и (19) было получено, что энергия разрядного канала, возникающего между шариками загрузки, для шариков разного диаметра изменяется в разном диапазоне. То есть для  $d_{\text{шар}} = 8$  мм энергия  $q_{\text{кан}}$  изменяется в диапазоне от 0 до  $3,6 \cdot 10^{-2}$  Дж, для  $d_{\text{шар}} = 6$  мм энергия  $q_{\text{кан}}$  изменяется от 0 до  $2,7 \cdot 10^{-2}$  Дж, а для  $d_{\text{шар}} = 4$  мм энергия  $q_{\text{кан}}$  изменяется от 0 до  $1,8 \cdot 10^{-2}$  Дж. Это объясняется тем, что значения тока, формируемых электрических импульсов, зависят от массы загрузки, которая изменялась в зависимости от диаметра шариков загрузки. Исследование зависимости тока электрических импульсов от массы загрузки не производилось, так как в электроэрозионной водоочистной установке, в процессе ее функционирования, происходит корректировка массы загруженных металлических шариков и существенного снижения массы загрузки в аппарате не происходит. Однако, ввиду неоднозначного изменения  $q_{\text{имп}}$ , и как следствие  $q_{\text{кан}}$ , использование алгебраического полинома для построения регрессионной модели является затруднительным.

Результаты экспериментальных исследований были обработаны с помощью статистических методов. В частности, для обработки экспериментальных данных использовался программный инструмент *cftool* пакета MatLab. В результате обработки результатов экспериментов, была

получена регрессионная модель, описывающая зависимость диаметра образовавшихся лунок от энергии разрядного канала, возникающего между шариками и диаметра шариков загрузки. Полученное выражение имеет следующий вид:

$$d_{\text{лун}} = \left( 73,96 \cdot d_{\text{шар}}^2 - 930,1 \cdot d_{\text{шар}} + 3602 \right) \cdot q_{\text{кан}}^{0,2309} + \left( 27,16 \cdot d_{\text{шар}}^2 + 218,1 \cdot d_{\text{шар}} - 278,4 \right), \quad (20)$$

где  $d_{\text{лун}}$  – диаметр лунок, образующихся на поверхности металлических шариков (мкм);  $d_{\text{шар}}$  – диаметр металлических шариков загрузки (мм);  $q_{\text{кан}}$  – энергия разрядного канала, возникающего между шариками загрузки (Дж).

Для проверки адекватности полученного выражения было произведено сопоставление экспериментальных и расчетных данных. Полученные результаты представлены на рисунках 21–23.

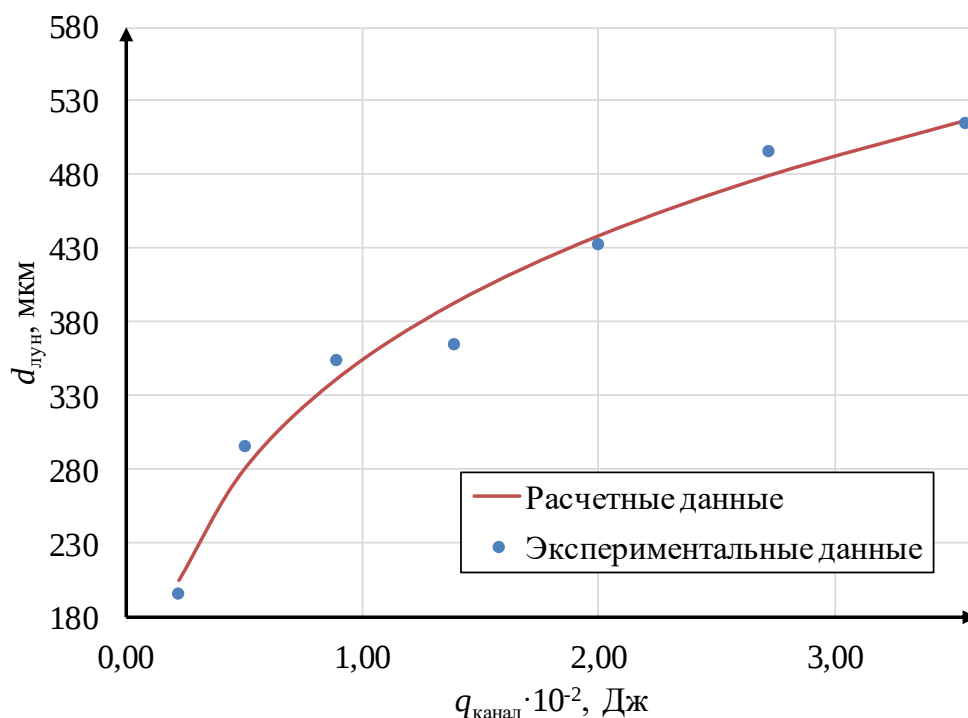


Рисунок 21 – Изменение диаметра эрозионных лунок на металлических шариках с  $d_{\text{шар}} = 8 \text{ мм}$

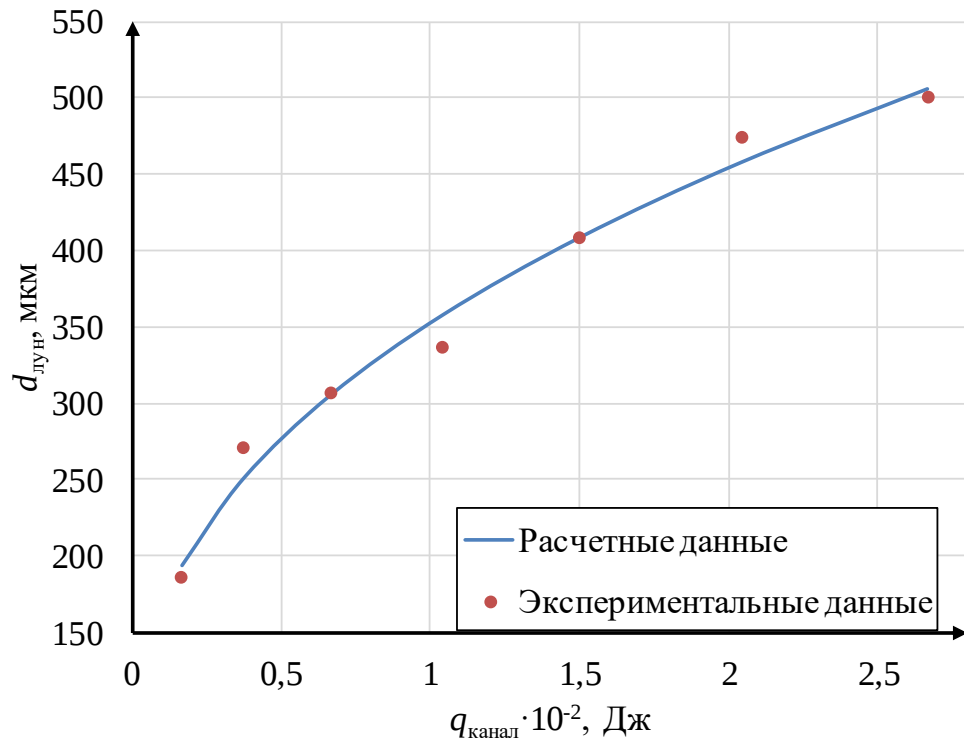


Рисунок 22 – Изменение диаметра эрозионных лунок на металлических шариках с  $d_{\text{шар}} = 6$  мм

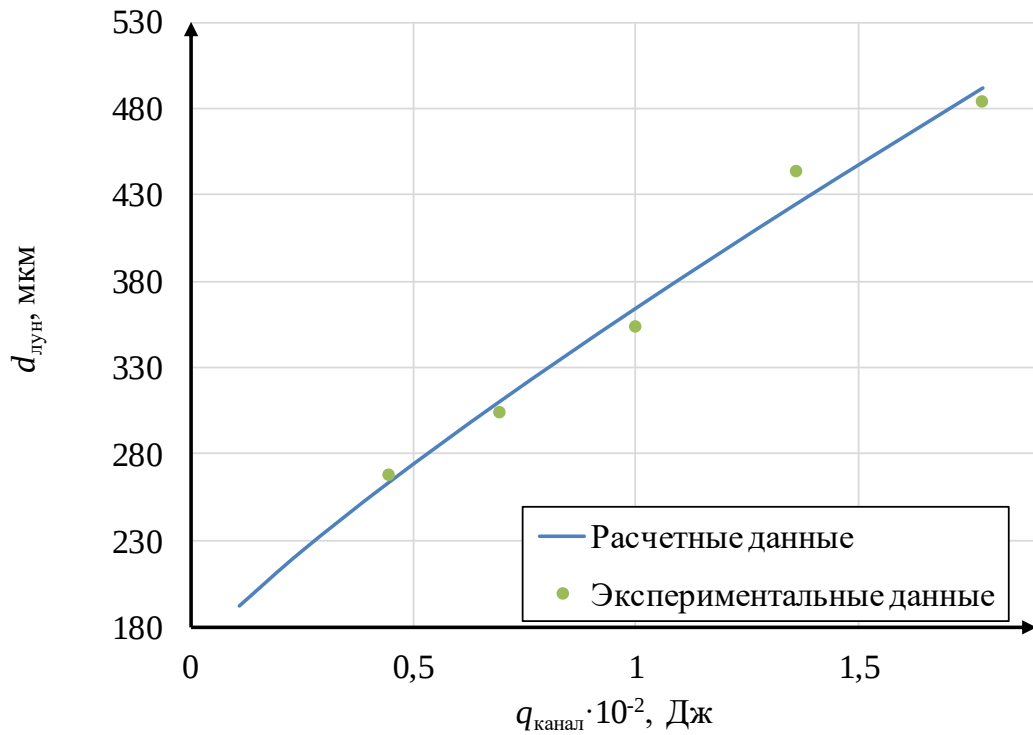


Рисунок 23 – Изменение диаметра эрозионных лунок на металлических шариках с  $d_{\text{шар}} = 4$  мм

Для определения адекватности полученного выражения было рассчитано приведенное среднеквадратическое отклонение. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов

|                              |     |     |     |
|------------------------------|-----|-----|-----|
| $d_{\text{шар}}, \text{ мм}$ | 8   | 6   | 4   |
| $\delta, \%$                 | 4,9 | 4,2 | 4,8 |

Как видно из полученных данных, расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет менее 5 %, что позволяет считать выражение (20) адекватным и использовать его для дальнейших расчетов.

Имея выражение для определения диаметра образующихся лунок, можно рассчитать их радиус, необходимый для определения объема лунки по выражению (17). Также для определения объема лунки необходимо знать ее глубину. Глубина образовавшейся лунки зависит от энергии разряда, образовавшегося между двумя шариками и от тепловых свойств материала (теплоемкости), из которого сделаны шарики. Тогда глубина лунки определяется из выражения [10]:

$$h_{\text{лун}} = \frac{q_{\text{плав}}}{c_{\text{шар}} \cdot (T_{\text{плав}} - T_{\text{шар}}) \cdot \rho_{\text{шар}}}, \quad (21)$$

где  $q_{\text{плав}}$  – количество энергии, разрядного канала, которое приходится на плавление металлических шариков ( $\text{Дж}/\text{мм}^2$ );  $c_{\text{шар}}$  – теплоемкость материала, из которого сделаны шарики ( $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ );  $T_{\text{плав}}$  – температура плавления материала, из которого сделаны шарики (К);  $T_{\text{шар}}$  – температура шариков в аппарате, фактически равна температуре входного водного раствора  $T_{\text{вх.рас.}}$  (К);  $\rho_{\text{шар}}$  – плотность материала, из которого сделаны шарики ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Энергия разрядного канала, которая приходится на плавление металлических шариков, определяется согласно выражению [16, 12]:

$$q_{\text{плав}} = \frac{4,45 \cdot k_{\text{эф}} \cdot q_{\text{кан}}}{\pi \cdot R_{\text{лун}}^2}, \quad (22)$$

где  $k_{\text{эф}}$  – коэффициент эффективной доли энергии, которая уходит на нагревание и плавление металлических шариков.

В результате экспериментальных исследований, проведенных в работе [71], было определено, что эффективная доля энергии, затрачиваемая на эрозию металлических шариков, зависит от электрофизических свойств обрабатываемого водного раствора. Основная часть энергии ( $\approx 85\%$ ) разрядного канала расходуется на пробой воды, световые явления, а также ударную волну. Таким образом, для выражения (22) коэффициент эффективной доли энергии, которая уходит на нагревание и плавление металлических шариков равен:

$$k_{\text{эф}} = 0,028 \cdot e^{0,13\gamma}, \quad (23)$$

где  $\gamma$  – электропроводность обрабатываемого водного раствора.

Используя выражения (20) и (21) была рассчитана форма образующейся эрозионной лунки. Полученные результаты представлены на рисунке 24.

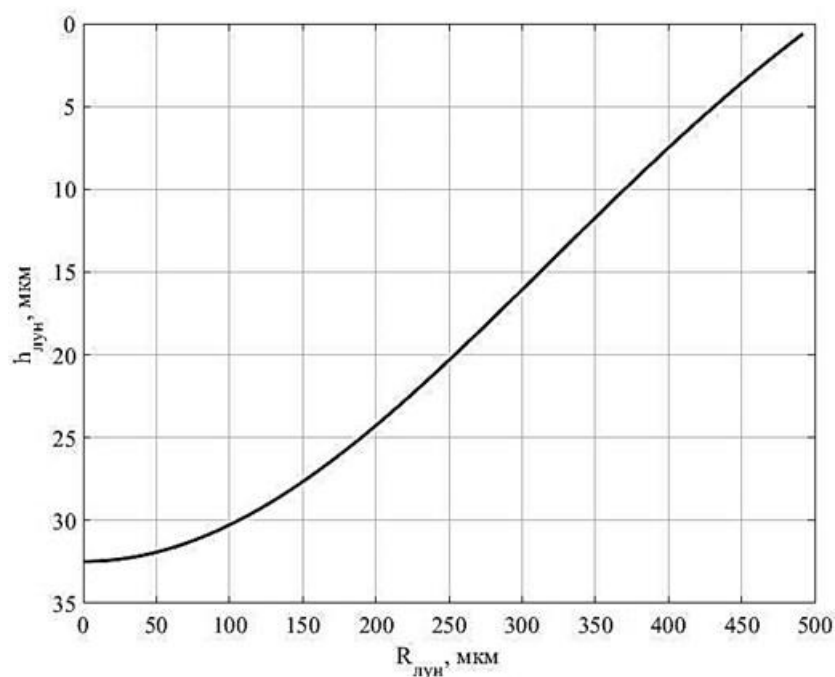


Рисунок 24 – Ассиметричное изображение формы образующихся лунок

Как видно, рассчитанные форма и размеры эрозионной лунки совпадают с формой и размерами лунки, полученными в результате исследования экспериментальных образцов с помощью трехмерного бесконтактного профилометра Micro Measure 3D Station (рисунок 20).

Зная количество возникших электрических разрядов между шариками, загруженными в аппарат и объем образующихся эрозионных лунок можно рассчитать массу образующихся продуктов электрической эрозии. В результате одного импульса образуется  $N_{\text{раз}}$  разрядов, в результате чего образуется  $2 \cdot N_{\text{раз}}$  лунок на шариках загрузки, так как лунки образуются на обоих шариках, между которыми возникает разряд. В результате массу образовавшихся продуктов можно рассчитать с помощью следующего выражения:

$$\frac{dm_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}}{dt} = 2 \cdot N_{\text{раз}} \cdot V_{\text{лун}} \cdot \rho_{\text{шар}}. \quad (24)$$

В результате электрической эрозии металлических шариков происходит изменение массы загрузки в аппарате:

$$\frac{dm_{\text{загр}}}{dt} = m_{\text{загр}}^0 - m_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}, \quad (25)$$

где  $m_{\text{загр}}^0$  – исходная масса загрузки в аппарате (г).

Согласно принятому допущению, в результате электрической эрозии происходит равномерное уменьшение диаметров металлических шариков загрузки по всему объему аппарата. При этом диаметр шариков определяется из формулы:

$$\frac{dd_{\text{шар}}}{dt} = \left( \frac{3 \cdot m_{\text{шар}}}{2 \cdot \pi \cdot \rho_{\text{шар}}} \right)^{1/3}, \quad (26)$$

где  $m_{\text{шар}}$  – масса каждого металлического шарика загрузки, пересчитываемая в процессе моделирования, по следующей формуле:

$$\frac{dm_{\text{шар}}}{dt} = \frac{m_{\text{загр}}}{N_{\text{all}}}, \quad (27)$$

где  $N_{\text{all}}$  – количество все шариков, загруженных в аппарат (шт.).

Концентрация образовавшихся продуктов электрической эрозии в аппарате изменяется согласно выражению:

$$\frac{dC_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}}{dt} = \frac{m_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}}{V_{\text{в.р.}}} - \frac{Q_{\text{обр.рас.}}}{V_{\text{в.р.}}} \cdot C_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}, \quad (28)$$

где  $V_{\text{в.р.}}$  – объем обрабатываемого водного раствора в аппарате ( $\text{м}^3$ ), определяется с помощью выражения:

$$V_{\text{в.р.}} = (W_{\text{ап}} \cdot L_{\text{ап}} \cdot H_{\text{ап}}) - (m_{\text{загр}} \cdot \rho_{\text{шар}}). \quad (29)$$

Концентрация вредных примесей, содержащаяся в обрабатываемом водном растворе, изменяется согласно выражению:

$$\frac{dC_{\text{обр.рас.}}^i}{dt} = \frac{Q_{\text{обр.рас.}}}{V_{\text{в.р.}}} \cdot (C_{\text{вх.рас.}}^i - C_{\text{обр.рас.}}^i). \quad (30)$$

В результате изменения концентрации примесей, содержащихся в водном растворе, изменяется электропроводность обрабатываемого водного раствора согласно выражению:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{C_{\text{обр.рас.}}^i}{k_{\gamma}}, \quad (31)$$

где  $k_{\gamma}$  – эмпирический коэффициент, определяющий зависимость проводимости раствора от концентрации примесей в нем ( $k_{\gamma} = 0,65$ ) [94].

Итоговая система дифференциально-алгебраических уравнений, описывающая процесс образования продуктов электрической эрозии, имеет следующий вид [95]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dC_{\text{обр.рас.}}^i}{dt} = \frac{Q_{\text{обр.рас.}}}{V_{\text{в.р.}}} \cdot (C_{\text{вх.рас.}}^i - C_{\text{обр.рас.}}^i), \\
\frac{dC_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}}{dt} = \frac{m_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}}{V_{\text{в.р.}}} - \frac{Q_{\text{обр.рас.}}}{V_{\text{в.р.}}} \cdot C_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}, \\
\frac{d\gamma}{dt} = \frac{C_{\text{обр.рас.}}^i}{k_{\gamma}}, \\
\frac{dm_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}}{dt} = 2 \cdot N_{\text{раз.}} \cdot V_{\text{лун}} \cdot \rho_{\text{шар}}, \\
V_{\text{лун}} = 0,5 \cdot \pi \cdot R_{\text{лун}}^2 \cdot h_{\text{лун}}, \\
d_{\text{лун}} = (73,96 \cdot d_{\text{шар}}^2 - 930,1 \cdot d_{\text{шар}} + 3602) \cdot q_{\text{кан}}^{0,2309} + \\
+ (27,16 \cdot d_{\text{шар}}^2 + 218,1 \cdot d_{\text{шар}} - 278,4), \\
h_{\text{лун}} = \frac{q_{\text{плав}}}{c_{\text{шар}} \cdot (T_{\text{плав}} - T_{\text{шар}}) \cdot \rho_{\text{шар}}}, \\
q_{\text{плав}} = \frac{4,45 \cdot k_{\text{эф}} \cdot q_{\text{кан}}}{\pi \cdot R_{\text{лун}}^2}.
\end{array} \right. \quad (32)$$

Разработанные математические модели первой и второй стадий электроэрозионного процесса очистки воды взаимосвязаны между собой (рисунок 25).

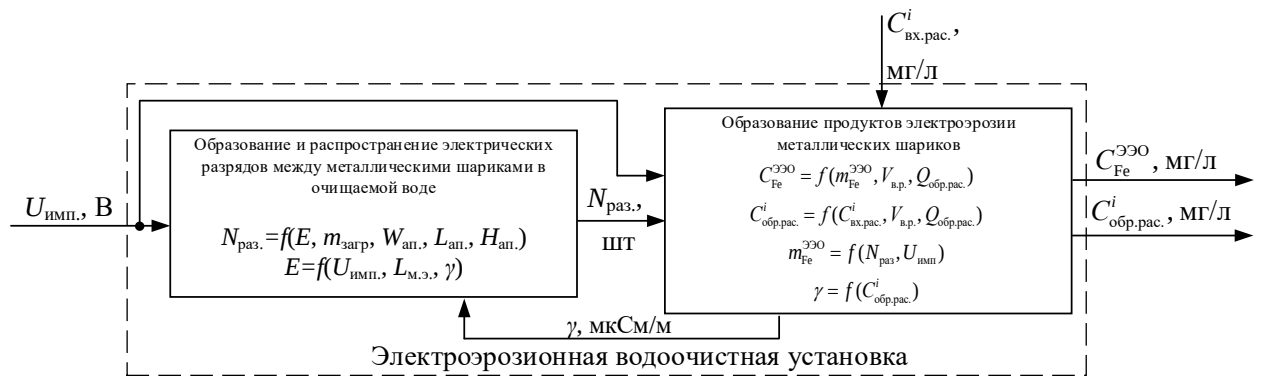


Рисунок 25 – Информационная модель электроэрозионного процесса очистки воды как объекта моделирования

Разработанная математическая модель была проверена на адекватность путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

## 2.4 Проверка адекватности разработанной математической модели электроэрозионного процесса очистки воды

Разработанная математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды была реализована в виде программного кода в пакете MatLab. Проверка адекватности разработанной модели производилась путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных. Для этого моделирование производилось при тех же параметрах, что и экспериментальные исследования.

Отдельно была произведена проверка адекватности математической модели процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе, разработанной на базе вероятностных клеточных автоматов. Для этого была проведена серия экспериментальных исследований, которая заключалась в следующем. В аппарат, заполненный водой с известной электропроводностью, были загружены металлические шарики в один слой. Через загруженные шарики, от генератора, пропускались единичные электрические импульсы определенной амплитуды. При этом производилась фотофиксация электрических разрядов, возникающих между металлическими шариками, в аппарате.

Для исследований был использован бак-реактор в форме прямоугольного параллелепипеда со следующими геометрическими параметрами:  $W_{\text{ап.}} = 100$  мм,  $L_{\text{ап.1}} = L_{\text{м.э.1}} = 100$  и  $L_{\text{ап.2}} = L_{\text{м.э.2}} = 180$  мм. Длина аппарата и длина межэлектродного пространства равны, так как электроды были размещены на противоположных стенках аппарата. Исследования были проведены для межэлектродного пространства разной длины. Для загрузки использовались шарики  $d_{\text{шар.}} = 6$  мм. При изменении длины межэлектродного пространства изменялась и масса загрузки:  $m_{\text{загр1}} = 30$  г,  $m_{\text{загр2}} = 41$  г. Через шарики пропускались электрические импульсы со следующими параметрами:  $t_{\text{имп.}} = 20 \cdot 10^{-6}$  с,  $U_{\text{имп.}} = 300$  В. В эксперименте использовались шарики из стали

марки ШХ-15 содержание железа в которой порядка 96-97 %. Шарики из данного материала обладают следующими характеристиками:  $\rho_{\text{шар.}} = 7800 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_{\text{шар.}} = 444 \text{ Дж/(г}\cdot\text{К)}$ ,  $T_{\text{плав.}} = 1808 \text{ К}$ .

Результаты моделирования и экспериментальных исследований представлены на рисунке 26.

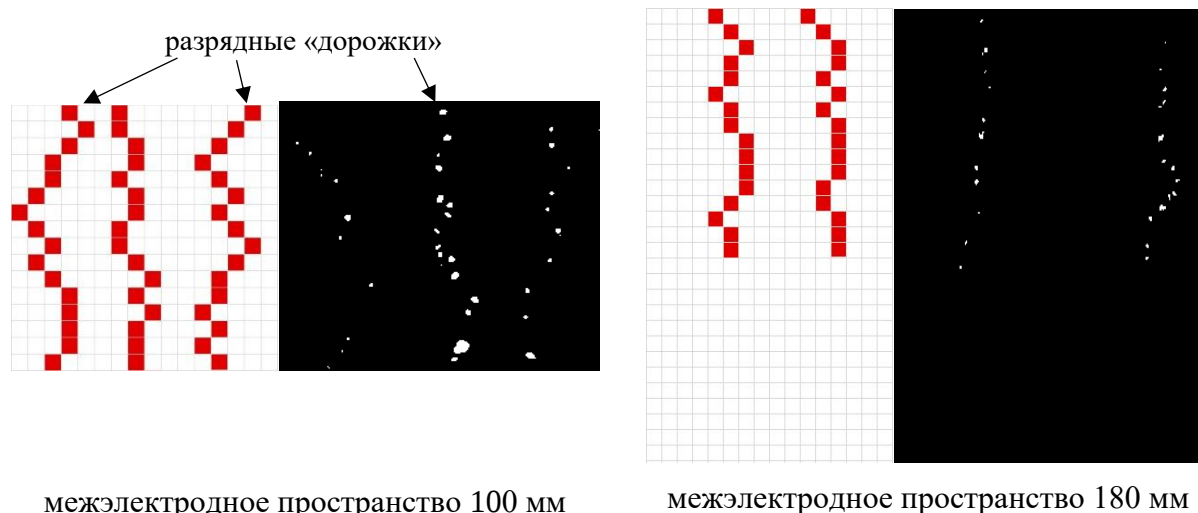


Рисунок 26 – Результаты моделирования и фотографии межэлектродного пространства

В результате исследований было сделано порядка 30 экспериментов для каждого межэлектродного промежутка. Количество разрядных «дорожек» каждый раз было разное и изменялось в интервале от 2 до 5 штук. Для проверки адекватности разработанной математической модели по имеющимся фотографиям экспериментов были рассчитаны вероятности возникновения разного числа разрядных траекторий для каждого из межэлектродных расстояний. В таблице 5 представлены полученные результаты.

Таблица 5 – Сопоставление результатов экспериментов и моделирования

| Количество<br>разрядных<br>«дорожек»                      | Длина межэлектродного пространства, мм |             |                           |             |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
|                                                           | 100                                    |             | 180                       |             |
|                                                           | Вероятность возникновения              |             | Вероятность возникновения |             |
|                                                           | Модель                                 | Эксперимент | Модель                    | Эксперимент |
| 2                                                         | 10,0 %                                 | 10,0 %      | 73,3 %                    | 66,6 %      |
| 3                                                         | 70,0 %                                 | 73,3 %      | 20,0 %                    | 26,7 %      |
| 4                                                         | 13,3 %                                 | 13,3 %      | 6,7 %                     | 6,7 %       |
| 5                                                         | 6,7 %                                  | 3,4 %       | 0 %                       | 0 %         |
| Приведенное<br>средне-<br>квадратическое<br>отклонение, % | 3,4                                    |             | 5,2                       |             |

Согласно полученным данным при межэлектродном расстоянии 100 мм характерным является возникновение 3 разрядных «дорожек», а при межэлектродном расстоянии 180 мм возникновение 2 разрядных «дорожек». Для численной оценки точности моделирования было рассчитано приведенное среднеквадратическое отклонение вероятностей появления разного числа разрядных траекторий по результатам моделирования от экспериментальных данных. Значения этих отклонений составляют менее 6 %.

Как видно из полученных данных (рисунок 26), при увеличении длины межэлектродного расстояния разрядные «дорожки» не достигают заземленного электрода. Это объясняется тем, что на определенном расстоянии от потенциального электрода напряжённость создаваемого электрического поля становится меньше некоторого критического значения (13-14). В результате этого часть металлической загрузки аппарата принимает на себя роль заземляющего электрода и не подвергается электрической эрозии. В связи с этим, определение оптимального значения напряжения подаваемых

электрических импульсов является актуальной задачей. При этом стоит учитывать, что бесконечное увеличение напряжения подаваемых электрических импульсов не приводит к бесконечному росту количества возникающих электрических разрядов. Для расчета оптимального значения напряжения подаваемых электрических импульсов, для определенного межэлектродного промежутка, может быть использована разработанная математическая модель процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе.

Для проверки адекватности разработанной математической модели, для объемной загрузки аппарата, было произведено сравнение расчетных значений, накопленных за 1 минуту продуктов эрозии, со значениями, полученными в ходе экспериментальных исследований и представленных в литературе [71, 96]. При моделировании было принято, что расход водного раствора через аппарат равен нулю и все образовавшиеся продукты эрозии остаются в аппарате. Моделирование производилось при параметрах процесса идентичных параметрам эксперимента и представленных в таблице 6.

Таблица 6 –Параметры моделирования процесса накопления продуктов эрозии

| Параметр          | Значение           | Единицы измерения | Описание параметра                                                           |
|-------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $U_{\text{имп.}}$ | 500                | В                 | Напряжение электрических импульсов                                           |
| $t_{\text{имп.}}$ | $20 \cdot 10^{-6}$ | с                 | Длительность электрических импульсов                                         |
| $f_{\text{имп.}}$ | 700                | Гц                | Частота электрических импульсов                                              |
| $W_{\text{ап.}}$  | 100                | мм                | Ширина межэлектродного пространства электроэрозионной водоочистной установки |
| $L_{\text{ап.}}$  | 100                | мм                | Длина межэлектродного пространства электроэрозионной водоочистной установки  |

|                    |     |    |                                                                              |
|--------------------|-----|----|------------------------------------------------------------------------------|
| $H_{\text{ап.}}$   | 125 | мм | Высота межэлектродного пространства электроэрозионной водоочистной установки |
| $m_{\text{загр.}}$ | 300 | г  | Масса металлических шариков загружаемых в аппарат (масса загрузки)           |
| $d_{\text{шар.}}$  | 6   | мм | Диаметр металлических шариков загружаемых в аппарат                          |

Полученные зависимости представлены на рисунке 27.

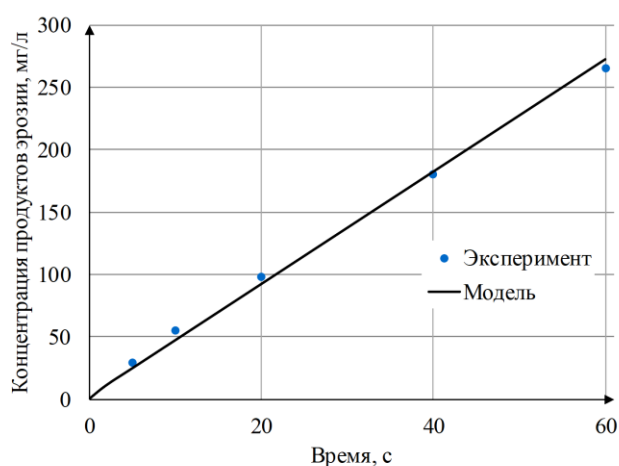


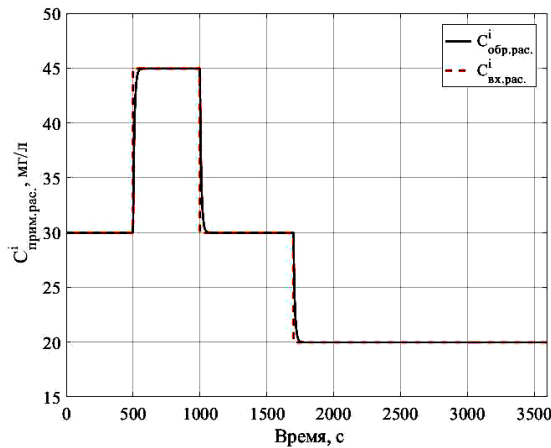
Рисунок 27 – Изменение концентрации продуктов эрозии в воде в зависимости от продолжительности обработки

Для данных, представленных на рисунке 27, было рассчитано приведенное среднеквадратическое отклонение. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет 5,6 %, что позволяет считать разработанную модель адекватной и использовать ее для дальнейшей работы.

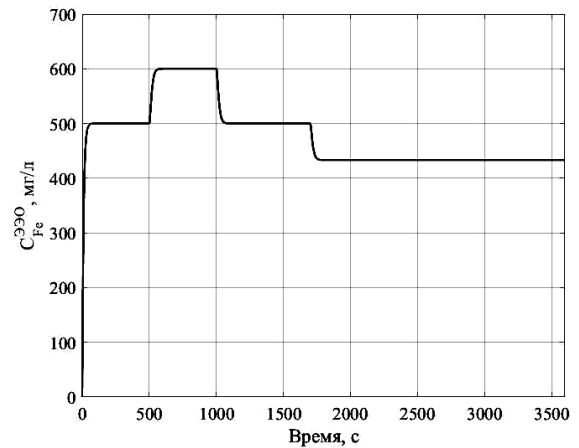
Следующим этапом было моделирование процесса электроэрозионной очистки воды в динамике. Исходные и экспериментальные данные были взяты из литературных источников [71].

Производилось моделирование электроэрозионного процесса очистки воды производительностью 1 м<sup>3</sup>/ч. Расходы водного раствора на входе и на

выходе из установки равны и составляют 0,278 л/с. Обрабатываемая вода пребывает в баке-реакторе порядка 10 с, а объем обрабатываемой воды составляет 2,78 л. Масса загруженных металлических шариков составляет 1,5 кг. Обработка металлической загрузки производится электрическими импульсами со следующими параметрами:  $U_{\text{имп.}} = 500 \text{ В}$ ,  $t_{\text{имп.}} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ,  $f_{\text{имп.}} = 700 \text{ Гц}$ . Результаты моделирования представлены на рисунке 28.



Изменение концентрации вредных примесей в очищаемом водном растворе на входе в аппарат и в аппарате



Изменение концентрации продуктов электрической эрозии в обрабатываемом водном растворе в аппарате

Рисунок 28 – Результаты моделирования

Как видно из полученных зависимостей (рисунок 28), концентрация продуктов электрической эрозии в обрабатываемом водном растворе равна 500 мг/л, что соответствует данным, представленным в работе [71]. Это количество продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе позволяет стабильно и эффективно протекать химическим процессам в баке-отстойнике.

В процессе моделирования было произведено ступенчатое изменение концентрации вредных примесей, содержащихся в исходном водном растворе. При этом происходит изменение концентрации вредных примесей, растворенных и содержащихся в обрабатываемом водном растворе. Изменение концентрации примесей приводит к изменению электропроводности обрабатываемого водного раствора, которая влияет на

напряжение пробоя водных прослоек между металлическими шариками загрузки.

В момент времени 500 секунд концентрация примесей в исходном растворе была увеличена с 30 мг/л до 45 мг/л, в результате изменилась концентрация примесей в обрабатываемом водном растворе. Следствием этого возмущающего воздействия явилось увеличение концентрации образующихся продуктов электрической эрозии. Так как в результате увеличения концентрации вредных примесей увеличилась электропроводность водного раствора [94], то соответственно снизилось минимальное необходимое напряжение, для возникновения пробоя [36, 72-74], при этом напряжение подаваемых электрических импульсов не изменялось, следовательно, возросла энергия электрических разрядов, возникающих между металлическими шариками, в результате чего образуются продукты эрозии больших размеров ( $>100$  нм). С увеличением размеров эродированных частиц снижается удельная площадь взаимодействия продуктов электрической эрозии и вредных примесей, содержащихся в воде [96, 97]. Поэтому образование продуктов эрозии больших размеров является нежелательным.

В момент времени 1700 секунд концентрация примесей в исходном растворе уменьшилась с 30 мг/л до 20 мг/л, в результате также изменилась концентрация примесей в обрабатываемом водного растворе. Следствием этого возмущающего воздействия явилось уменьшение концентрации образующихся продуктов электрической эрозии. Так как в результате уменьшения концентрации вредных примесей уменьшилась электропроводность водного раствора, то соответственно увеличилось необходимое напряжение, для возникновения пробоя, при этом напряжение подаваемых электрических импульсов не изменялось, следовательно, снизилась напряженность создаваемого электрического поля, уменьшилось число возникающих электрических разрядов между шариками, а также уменьшилась их энергия, в результате чего снизилась масса образующихся

продуктов электрической эрозии в результате одного электрического импульса.

Таким образом, для стабильного и эффективного протекания химических процессов осаждения вредных примесей, содержащихся в обработанном водном растворе, необходимо поддерживать концентрацию продуктов электрической эрозии на постоянном заданном уровне. Для решения этой задачи целесообразно использовать систему управления, которая позволит удерживать концентрацию образующихся продуктов электрической эрозии на постоянном уровне варьируя напряжение подаваемых электрических импульсов.

## **2.5 Выводы по главе**

Вторая глава посвящена разработке математической модели электроэрозионного процесса очистки воды. Работа по моделированию процесса была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) в рамках проекта № 16-31-00085 мол\_а «Математическое моделирование и оптимизация электроэрозионного метода очистки воды».

В результате проведенного анализа было выделено две стадии протекания процесса: распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе и образования продуктов электрической эрозии. Для разработки математической модели процесса была разработана информационная модель электроэрозионной водоочистной установки как объекта моделирования (Глава 1, рисунок 5).

Для моделирования процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе не подходят классические методы моделирования с использованием дифференциальных уравнений. В результате проведенного литературного обзора не было выявлено работ, посвященных моделированию данного процесса или схожего

с ним. В связи с этим, возникла необходимость разработать подход, который позволит описать данный процесс. В результате был разработан подход, основанный на применении вероятностных клеточных автоматов. Используя предложенный подход была разработана математическая модель процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе.

Также во второй главе представлена математическая модель, описывающая процесс образования продуктов электрической эрозии в баке-реакторе водоочистой установки. С помощью системы дифференциально-алгебраических уравнений описан материальный баланс примесей и продуктов эрозии в водоочистой установке.

Для оценки адекватности, разработанной математической модели, было рассчитано приведенное среднеквадратическое отклонение расчетных данных от экспериментальных. Расхождение между данными составило порядка 6 %, что позволяет считать разработанную модель адекватной и использовать для дальнейшей работы.

Используя разработанную математическую модель было произведено моделирование процесса электроэрозионной обработки воды в течении 1 часа. При моделировании были поданы возмущающие воздействия на процесс. В результате были получены зависимости, демонстрирующие функционирование электроэрозионной водоочистой установки в зависимости от концентрации вредных примесей, содержащихся в обрабатываемом водном растворе. По результатам моделирования обоснована необходимость в разработке автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистой установкой.

### **3 Разработка автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистой установкой**

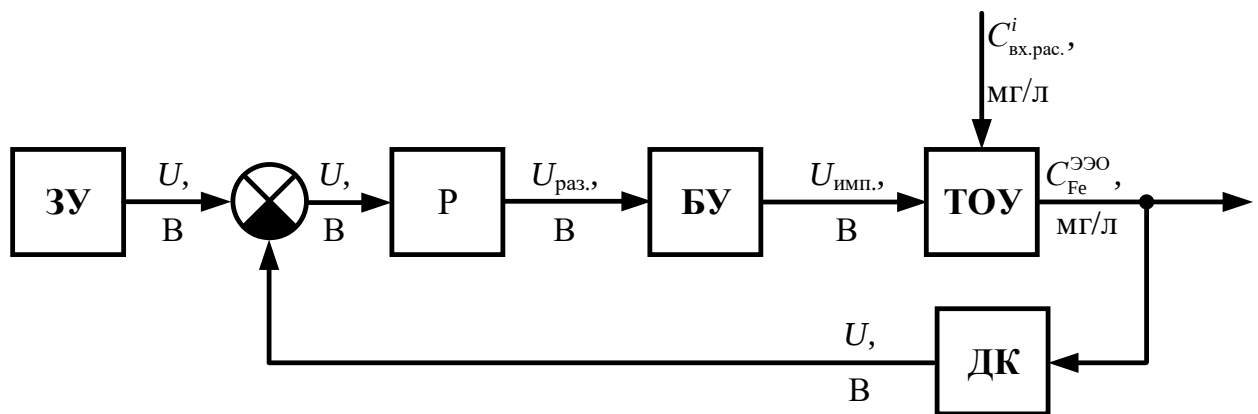
Функционирование любого современного технологического процесса не обходится без системы управления. Необходимость в разработке и применении систем управления для различных технологических процессов обусловлена требованиями повышения эффективности, безопасности и стабильности протекания процессов. Особенно актуальной задачей это является для технологических процессов химической, атомной, нефте- и газоперерабатывающей промышленности, где предъявляются повышенные требования к эффективности и безопасности протекания процессов.

С учетом быстрых темпов развития как вычислительной, так и контрольно-измерительной техники и технологий, появляются новые методы и подходы к управлению технологическими процессами. Наибольшей популярностью для управления технологическими процессами пользуются системы управления на базе ПИ- и ПИД-регуляторов [98-100]. Популярность данных регуляторов объясняется их простотой настройки и легкостью технической реализации. В отечественной и зарубежной литературе имеется большое количество работ, посвященных применению ПИ- и ПИД-регуляторов для управления процессами водоочистки [101-103]. В последнее время опубликовано достаточное количество исследований, посвященных усовершенствованию ПИ- и ПИД-регуляторов с помощью применения нечеткой логики [104-108].

Однако, в последние десятилетия, активно развивается и применяется для управления технологическими процессами метод управления, базирующийся на использовании прогнозирующих моделей процесса [109-111]. Исследователями опубликовано большое количество работ, посвященных разработке систем управления на базе прогнозирующих моделей для управления процессами водоочистки [112-114].

### 3.1 Функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой

Одним из этапов синтеза автоматизированной системы управления технологическим процессом является составление функциональной схемы [115]. В ходе диссертационного исследования была разработана функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой, состоящая из функционально необходимых элементов. Разработанная схема представлена на рисунке 29.



ЗУ – задающее устройство, Р – регулятор, БУ – блок управления, ТОУ – технологический объект управления, ДК – датчик концентрации продуктов электрической эрозии

Рисунок 29 – Функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой

ТОУ является бак-реактор электроэрозионной водоочистной установки, выполненный из диэлектрического материала. В баке-реакторе расположены два электрода, подключаемые к блоку управления, в состав которого входит генератор электрических импульсов.

Разработанная система управления (рисунок 29) работает следующим образом. С помощью задающего устройства задается желаемое значение контролируемой переменной (концентрация продуктов электрической эрозии). С помощью датчика концентрации измеряется текущее значение концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном

растворе. Сигнал с датчика сравнивается с заданным значением. На основании сигнала рассогласования регулятор рассчитывает необходимое значение напряжения подаваемых электрических импульсов и формирует сигнал, который поступает на блок управления. На основании сигнала с регулятора блок управления формирует управляющее воздействие, в виде электрических импульсов определенной амплитуды, на технологический объект управления, тем самым оказывая влияние на изменение контролируемой переменной.

Точное измерение контролируемой переменной является актуальной задачей. В настоящее время для измерения концентрации компонентов в растворе предлагаются различные технические решения. Однако они обладают определенными недостатками: высокая стоимость, низкая чувствительность и помехозащищенность, невозможность применения при большом расходе раствора. В ходе диссертационного исследования было предложено техническое решение для измерения концентрации продуктов электрической эрозии в водном растворе с помощью спектрофотометрического метода.

### **3.2 Датчик концентрации компонентов в растворе**

Не существует универсального метода и подхода для измерения концентрации компонентов в растворе. В промышленности нашли применение такие методы, как рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) и гамма-абсорбционный анализ, однако их применение имеет свои недостатки. Использование рентгенофлуоресцентного анализа затруднено при наличии больших концентраций детектируемого компонента в растворе, в этом случае прибегают к разбавлению исследуемого раствора, при использовании РФА невозможно обеспечить измерение концентрации изотопов в исследуемом растворе, также нельзя определить самые легкие химические элементы, такие как водород, углерод, азот, кислород. Гамма-абсорбционный метод в основном используют для определения тяжелых компонентов в рудах, а также

продуктах обогащения. В недостаточной мере реализованы возможности данного метода для контроля продуктов в потоке. Кроме того, использование этих методов, для контроля концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе, является нежелательным, в виду того, что в них используются источники рентгеновского или гамма-излучений.

Также в химической промышленности используется кондуктометрический метод анализа, который позволяет определить общую концентрацию ионов в растворе, в зависимости от электропроводности анализируемого раствора. Однако низкая селективность данного метода значительно сужает область его применения. Использование кондуктометрического метода, для измерения концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе, осложняется и тем, что продукты электрической эрозии представляют из себя высокодисперсные металлические частицы, которые находятся в водном растворе в виде суспензии и их влияние на электропроводность водного раствора не изучена.

В ряде случаев, при медленном протекании химико-технологического процесса, концентрация целевого компонента в растворе определяется лабораторными методами на заранее отобранных пробах. В связи с выше сказанным, становится ясно, что задача измерения концентрации продуктов электрической эрозии в потоке обработанного водного раствора является достаточно актуальной.

На сегодняшний день, на рынке измерительных систем и датчиков лидирующие позиции занимают приборы на базе электронных измерительных технологий. Использование электронных измерительных технологий предполагает преобразование измеряемого технологического параметра в электрический сигнал с последующей его обработкой. Альтернативой электронным измерительным технологиям являются оптические измерительные системы, в которых измеряемый технологический параметр преобразуется в оптический сигнал и передается посредством оптоволокну [116].

Несмотря на стабильное развитие оптических технологий и явные преимущества над электронными технологиями (взрывобезопасность, невосприимчивость к электромагнитным помехам, высокая разрешающая способность), доля оптических датчиков на рынке измерительных систем остается небольшой. Фактически, оптические датчики применяют лишь там, где электронные измерительные средства не могут быть использованы в силу тех или иных причин.

Стоит отметить две очевидные тенденции на сегодняшний день. Во-первых, происходит быстрое развитие смежных технологий таких, как передача информации с помощью оптоволоконных кабелей, обработка изображения посредством цифровой фото- и видеоаппаратуры, а также развитие микропроцессорной техники. Все это положительно влияет на развитие оптической измерительной техники и способствует снижению стоимости изготовления [117]. Во-вторых, с каждым годом растут требования к условиям эксплуатации измерительной техники, а именно, требования на взрывобезопасность, на помехозащищенность, на точность измерений, на работу в агрессивных средах и т.д. Именно этим параметрам соответствуют оптические датчики [118].

В оптических датчиках оптическое волокно может быть применено просто в качестве линии передачи, а может играть роль самого чувствительного элемента датчика (сенсора). В последнем случае используются чувствительность волокна к вибрации, температуре, давлению, деформациям, к электрическому полю (эффект Керра), магнитному полю (эффект Фарадея), к ионизирующему излучению (эффект Черенкова) и др.

### **3.2.1 Общие сведения об оптических измерительных системах**

В 1860-х годах русский инженер В.Н. Чиколев применил световоды для передачи света по прямому и изогнутому пути с целью освещения пороховых погребов Охтинского порохового завода в Петербурге. В 1920-х годах гибкие

оптические волокна стали применять для освещения, преимущественно в медицине [119]. А в 1956 году Л. Куртисс (L. Curtiss) впервые изготовил оптическое волокно в виде структуры сердцевина-оболочка по методу «палочка-в-трубке». Современная волоконная оптика стала развиваться в начале 70-х годов, когда практически одновременно в нескольких странах для изготовления оптических волокон была использована технология осаждения из газовой фазы (MCVD технология) [120]. В это же время начались и первые работы по созданию высококачественных оптических волокон в СССР для телекоммуникационных применений, главным образом в Академии Наук. В 1976 году была продемонстрирована первая волоконно-оптическая система передачи для голоса и данных. Наибольшее развитие оптические технологии получили в 1980-е годы. В 1981 было изобретено многомодовое волокно с диаметром сердцевины 62,5 мкм – всемирный стандарт оптического волокна для локальных сетей. Затем в 1985 году изобретен наиболее популярный во всем мире волоконно-оптический байонетный соединитель типа ST. В 1988 году «Bell Laboratories» продемонстрировала передачу данных в солитоновом режиме на 4000 км по одномодовому оптическому волокну. В 1991-м году была продемонстрирована волоконно-оптическая передача сигналов со скоростью 10 Гбит/с на расстояние 2000 километров без регенерации, а в 1993 году японская компания «NTT» продемонстрировала передачу данных в солитоновом режиме на практически неограниченное расстояние – на 1 миллион и вскоре – на 180 миллионов километров. В 1990-е годы начались и практические реализации оптических датчиков и измерительных систем. К этому же периоду развития относятся и первые отечественные книжные публикации по оптическим датчикам [121, 122].

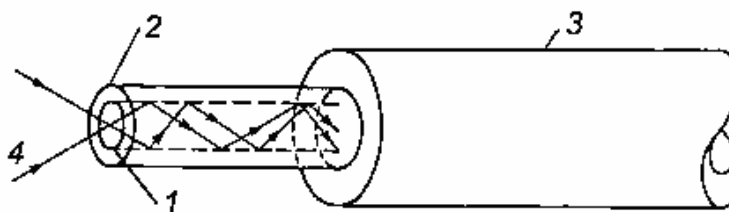
В современных условиях волоконно-интегральная оптика является инновационной технологией для многих приложений в топливно-энергетическом (атомная промышленность), нефтегазовом, строительном, транспортном и военно-промышленном комплексах.

Скорости передачи сигналов с применением волнового оптического мультиплексирования достигли 10 Терабит/с. Все более реальной становится перспектива построения все-оптических систем на базе новейших технологий оптической коммутации, мультиплексирования сигналов и оптической обработки информации. Существенный прогресс достигла и техника оптических соединений: появление миниатюрных матриц лазерных диодов и фотодиодов позволило реализовать оптические кассетные соединители и приборные розетки с количеством до 72 соединяемых волокон.

Большинство современных производителей и разработчиков оптических датчиков ориентированы на коммерциализацию разработок, которые были выполнены в 90-е годы прошлого столетия. В результате патентных исследований и обзора научной литературы было выявлено, что значительный интерес потребителей проявляется к оптическим датчикам, обеспечивающим высокую точность измерений, надежность при эксплуатации, максимальный межповерочный интервал и длительный срок службы. При этом стоит отметить, существенное отставание отечественных разработок от мировых в области оптических измерительных приборов и систем.

Оптическими датчиками называются устройства, в которых свет, распространяющийся внутри оптического волокна или внешнего первичного преобразователя, может изменяться под влиянием регистрируемого физического, химического, биологического, биомедицинского или какого-либо другого воздействия [123].

Основными элементами, на которых строятся оптические датчики являются оптические волокна, светоизлучающие и светоприемные устройства, а также оптические чувствительные элементы. Оптическое волокно состоит из сердцевины, по которой распространяется свет, и оболочки, которая заключена в оплетку, для защиты поверхности волокна и повышения его прочности (рисунок 30).



1 – сердцевина, 2 – оболочка, 3 – защитное покрытие, 4 – оптическое излучение

Рисунок 30 – Структура оптического волокна

Сердцевина и оболочка имеют разные ступенчато изменяющиеся показатели преломления, например,  $n_c$  и  $n_{об}$ , соответственно. Сердцевина при этом используется как среда передачи, а оболочка используется для создания границы раздела между ней и сердцевиной, как между двумя физическими средами, которые образует оптический волновод для распространения оптического излучения.

Оптическое волокно бывает двух типов: одномодовое, в котором распространяется только одна мода, и многомодовое — с передачей множества (около сотни) мод. Конструктивно эти типы оптических волокон различаются только диаметром сердечника — световедущей части, внутри которой коэффициент преломления чуть выше, чем в периферийной части — оболочке (рисунок 31).

В технике используются как многомодовые, так и одномодовые оптические волокна. Мномодовые волокна имеют относительно большой диаметр сердечника ( $\approx 50$  мкм), это облегчает их соединение друг с другом. Но поскольку групповая скорость света для каждой моды различна, то при передаче узкого светового импульса происходит его расширение (увеличение дисперсии).

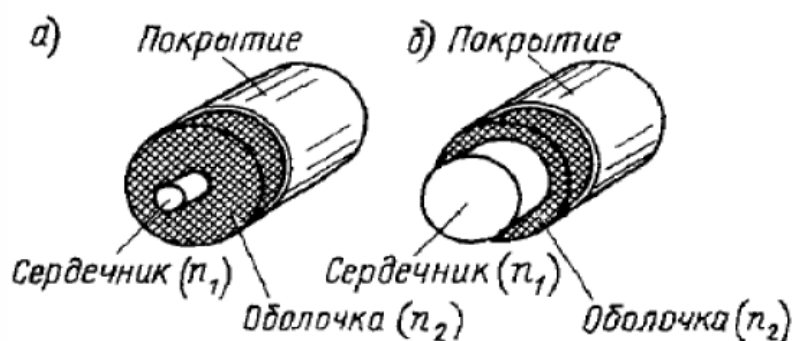


Рисунок 31 – Одномодовое (а) и многомодовое (б) оптические волокна

Обобщенно оптические датчики можно классифицировать по виду чувствительных оптических параметров на следующие:

- амплитудные (по интенсивности оптического сигнала);
- фазовые (интерференционные);
- частотные (дифракционные);
- туннельные (фазово-амплитудные);
- комбинированные (фазово-частотные).

Амплитудные оптические датчики – датчики, в которых измеряемый параметр модулирует амплитуду (мощность) проходящей или отраженной световой волны. Основным достоинством амплитудного метода съема информации является относительная простота технической реализации оптико-электронной схемы и ее относительно низкая стоимость. В качестве источника оптического излучения здесь может использоваться не лазер, а, например, светодиод, обеспечивающий заданную величину и стабильность мощности излучения [124].

Частотные оптические датчики – датчики, в которых изменяется частота пропускаемого света в зависимости от физических свойств исследуемого объекта.

Поляризационные оптические датчики – датчики, использующие информацию о поляризации световой волны. В таких датчиках воздействие измеряемой физической величины непосредственно или с использованием промежуточных преобразователей приводит к изменению поляризации

оптического излучения. Изменение поляризации в конечном счете преобразуется в изменение мощности (амплитуды) излучения, которое регистрируется фотоприемником.

В фазовых (интерферометрических) оптических датчиках в качестве чувствительного элемента могут использоваться как оптоволокно, так и внешний первичный преобразователь. Принцип действия их одинаков и основан на измерении сдвига фазы, обусловленного воздействием измеряемой физической величины, в частности давления. В датчиках с фазовой модуляцией наибольшее применение получили интерферометры Майкельсона, Маха-Цендера, Фабри-Перо и Саньяка. В интерферометрах Маха-Цендера и Саньяка в качестве чувствительного элемента используется только оптоволокно. Оптические датчики на основе интерферометров Майкельсона и Фабри-Перо могут использоваться в качестве чувствительного элемента как оптоволоконные, так и внешние первичные преобразователи, которые могут быть выполнены в миниатюрном исполнении. Общим достоинством интерферометрических датчиков является высокая чувствительность.

Туннельные оптические датчики – основаны на эффекте туннельного перетекания энергии одномодового оптического сигнала между выходами оптического разветвителя при внешнем воздействии на двулучепреломляющий компаунд чувствительной зоны [125, 126].

Комбинированные оптические датчики – основаны на одновременном применении двух или более видов чувствительных оптических параметров, например, и частоты, и фазы.

Структурные схемы оптических датчиков по типу взаимодействия с измеряемой средой приведены на рисунках 32 – 34 [127].

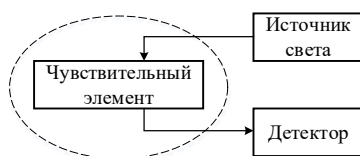


Рисунок 32 – Оптический датчик проходящего типа

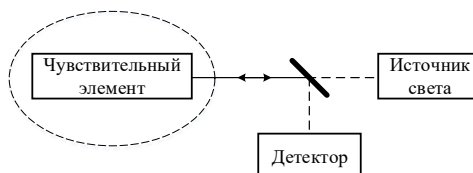


Рисунок 33 – Оптический датчик отражательного типа

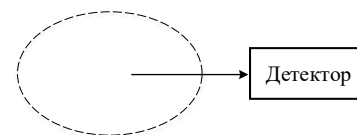


Рисунок 34 – Оптический датчик антенного типа

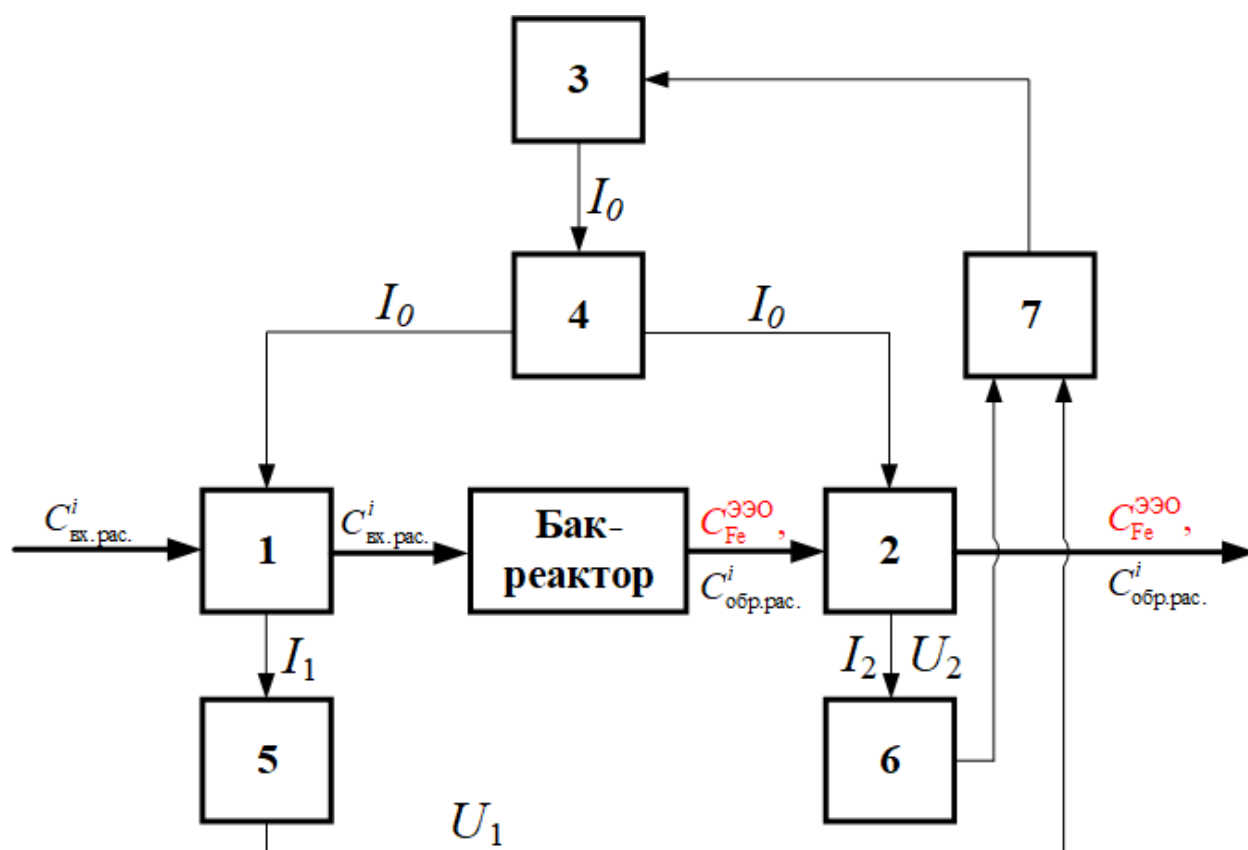
Также оптические датчики классифицируют по характеру использования оптических волокон [128]:

- оптические датчики, в которых волокно служит для передачи сигналов;
- оптические датчики, в которых волокно является чувствительным элементом.

В датчиках типа «линии передачи» используются в основном многомодовые оптические волокна, а в датчиках сенсорного типа чаще всего – одномодовые.

### 3.2.2 Оптический датчик концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе

В ходе диссертационного исследования была разработана оптическая измерительная система с применением оптоволоконных кабелей, предназначенная для измерения концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе. Структурная схема разработанной системы представлена на рисунке 35.



1 – эталонная кювета, 2 – измерительная кювета, 3 – широкополосный оптический излучатель, 4 – разветвитель светового потока, 5 и 6 – фотоприемники, 7 – блок электроники

Рисунок 35 – Схема оптической измерительной системы, предназначенной для измерения концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе

Принцип действия разработанной оптической измерительной системы заключается в следующем [23]. Исходный водный раствор проходит через эталонную кювету (1) и поступает в бак-реактор. После обработки в бак-реакторе водный раствор проходит через измерительную кювету (2). При этом через эталонную (1) и измерительную (2) кюветы от широкополосного оптического излучателя (3) пропускается световой поток с определенной длиной волны. Управление широкополосным оптическим излучателем (3) осуществляется с помощью блока электроники (7).

В результате прохождения светового потока через водный раствор происходит его поглощение. Пройденный через водный раствор световой поток регистрируют с помощью фотоприемников (5) и (6). Затем сигнал с фотоприемников поступает на блок электроники (7), в котором осуществляется пересчет интенсивности светового потока в значения концентрации образовавшихся продуктов электрической эрозии, по закону Бугера-Ламберта-Бера:

$$C_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}} = \frac{A}{\varepsilon \cdot l_{\text{кюв.}}} = \frac{\log_{10}(I_1/I_2)}{\varepsilon \cdot l_{\text{кюв.}}} \quad (33)$$

где  $A$  – количество света определенной длины волны, который был поглощен исследуемым раствором;  $\varepsilon$  – молярный коэффициент поглощения (коэффициент экстинкции) ( $\text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ );  $l_{\text{кюв.}}$  – расстояние, пройденное светом в растворе (см);  $I_1$  – интенсивность света, прошедшего исходный водный раствор ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $I_2$  – интенсивность света, прошедшего обработанный водный раствор ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

Для этого используется эмпирическое значение молярного коэффициента поглощения (экстинкции), при определенной длине волны пропускаемого света. Для определения концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе использовался коэффициент экстинкции  $\varepsilon = 34800 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  при длине волны пропускаемого света  $\lambda = 488 \text{ нм}$ .

Описанная измерительная система была реализована в виде действующего макета, с помощью которого было произведено исследование ее рабочих характеристик. В результате измерения концентрации продуктов электрической эрозии в водном растворе было установлено, что прибор адекватно работает в диапазоне от 0 до 1000 мг/л, при этом приведенная погрешность измерений в указанном диапазоне составляет порядка 3 %. На рисунке 36 представлена градуировочная характеристика оптической измерительной системы, предназначенной для измерения концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе.

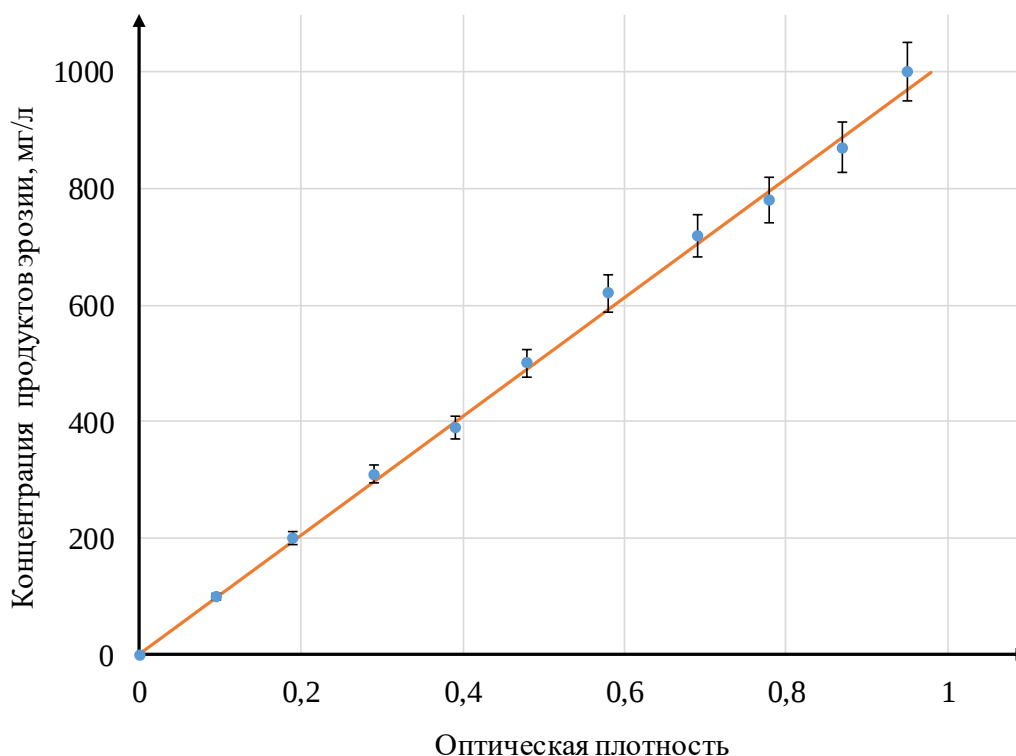


Рисунок 36 – Градуировочная характеристика оптической измерительной системы, предназначенной для измерения концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе

Использование оптической измерительной системы позволяет реализовать принцип удаленного измерения, обеспечивает надежность прибора, существенно снижает эксплуатационные расходы. Преимущество данной измерительной системы заключается в том, что сенсор является необслуживаемым, не требует подведения питания, разделительных сред и т.д., может работать в жестких условиях, а интеллектуальная часть прибора находится в комфортных условиях с удалением вплоть до десятков километров от точки установки сенсора.

Следующим этапом разработки автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистой установкой является выбор регулятора и его настройка.

### 3.3 Управление на базе прогнозирующей модели

В настоящее время наиболее распространенными подходами в управлении технологическими процессами являются применение ПИД-регуляторов и регуляторов на базе прогнозирующих моделей (Model Predictive Control – MPC).

Большую распространённость и популярность получили системы управления на базе ПИ- и ПИД-регуляторов [98-103]. Популярность данных регуляторов объясняется их простотой настройки и легкостью технической реализации. Кроме того, с целью усовершенствования ПИ- и ПИД-регуляторов проведено не мало исследований, посвященных объединению классических ПИ- и ПИД-регуляторов и нечеткой логики [104-107]. Однако, с связи со стремительным развитием вычислительной и контрольно-измерительной техники, появился новый подход к управлению технологическими процессами, основанный на применении математических моделей процессов управления. Исследователями опубликовано большое количество работ, посвященных разработке систем управления на базе прогнозирующих моделей для управления технологическими процессами [109-114].

С появлением подхода, основанного на применении прогнозирующих моделей для управления технологическими процессами, появились и исследования, направленные на выделение более эффективного регулятора. В ряде работ было показано, что для управления различными технологическими процессами более эффективно использовать систему управления на базе регулятора с прогнозирующей моделью, чем систему управления на базе ПИД-регулятора [129-135].

В ходе диссертационного исследования также было произведено сравнение системы управления на базе ПИД-регулятора с нечеткой логикой и системы управления на базе регулятора с прогнозирующей моделью [14].

### 3.3.1 Сравнение МРС регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой

В научной литературе имеется большое количество публикаций, посвященных исследованию и сравнению систем управления на базе МРС и ПИД-регуляторов [129-135]. Все эти работы демонстрируют превосходство МРС регулятора над классическим ПИД-регулятором. Также в литературе показано, что для повышения эффективности систем управления используют «гибридный» ПИД-регулятор, то есть ПИД-регулятор дополненный нечеткой логикой. В ходе диссертационного исследования было произведено сравнение систем управления на базе МРС регулятора и на базе ПИД-регулятора с нечеткой логикой. Полное описание исследуемых систем управления, а также структура используемого ПИД-регулятора с нечеткой логикой представлены в работах [14, 15]. В ходе исследования был рассмотрен сложный динамический объект управления, параметры которого изменяются в ходе технологического процесса. Изначально объект управления описывался передаточной функцией первого порядка:

$$W(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s}, \quad (34)$$

где  $k$  – коэффициент передачи объекта управления,  $T$  – постоянная времени объекта управления,  $\tau$  – время запаздывания объекта управления.

В ходе технологического процесса изменяется порядок передаточной функции, описывающей поведение объекта управления, например, в результате переключения режимов установки с одного на другой, при изменении химических или физических характеристик материала (сырья) и т.д. В ходе исследования передаточная функция объекта управления была изменена с первого порядка на третий:

$$W(s) = \frac{k}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1) \cdot (T_3 \cdot s + 1)} \cdot e^{-\tau \cdot s}, \quad (35)$$

где  $k$  – коэффициент передачи объекта управления;  $T_1, T_2, T_3$  – постоянные времени объекта управления;  $\tau$  – время запаздывания объекта управления.

Кроме изменения порядка передаточной функции, описывающей объект управления, в ходе исследования в систему были введены ступенчатые возмущающие воздействия.

Изначально настройка ПИД-регулятора с нечеткой логикой и МРС регулятора была выполнена для объекта управления, описываемого передаточной функцией первого порядка. В обеих системах автоматического управления (САУ) было наложено ограничение на диапазон изменения управляющего воздействия.

В момент времени 10 секунд было задано желаемое значение для контролируемой переменной (уставка). Полученные переходные процессы представлены на рисунке 37.

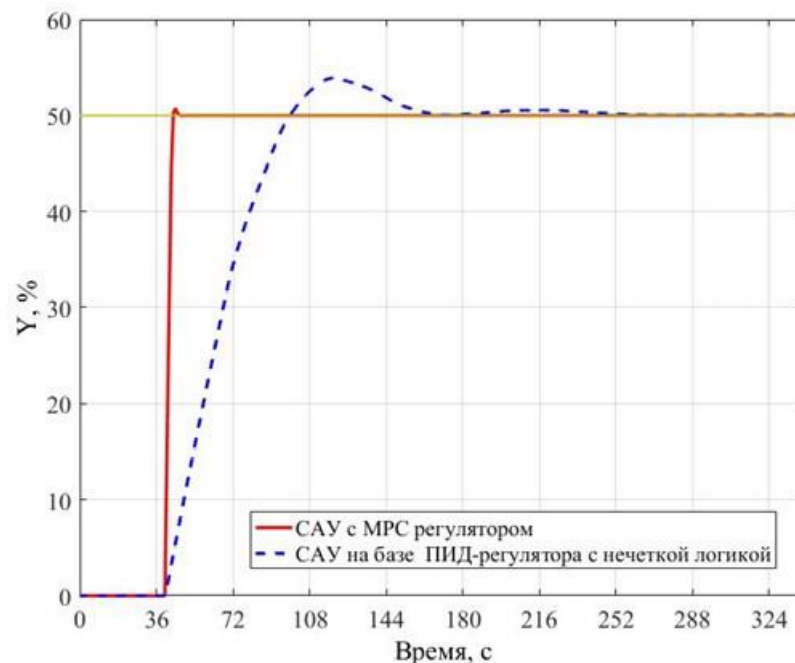


Рисунок 37 – Переходные процессы по задающему воздействию

Как видно из переходных процессов (рисунок 37), обе системы управления выводят контролируемую переменную на заданный уровень. При

этом время регулирования системы автоматического управления (САУ) на базе ПИД-регулятора с нечеткой логикой составило 129 секунд, а с МРС регулятором 33 секунды. Перерегулирование САУ на базе ПИД-регулятора с нечеткой логикой составило 7,8 %, а при использовании МРС регулятора перерегулирование отсутствует. Для переходных процессов, представленных на рисунке 37, был рассчитан интегральный квадратичный критерий ( $QIC$ ) качества переходных процессов с помощью следующего выражения:

$$QIC = \int_{t_1}^{t_2} (g(t) - y(t))^2 dt, \quad (36)$$

где  $g(t)$  – уставка,  $y(t)$  – контролируемая переменная. Результаты расчетов сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Интегральные показатели качества переходных процессов

| Регулятор                        | $QIC$             |
|----------------------------------|-------------------|
| ПИД-регулятор с нечеткой логикой | $1,14 \cdot 10^5$ |
| МРС регулятор                    | $7,78 \cdot 10^4$ |

Анализ полученных показателей качества переходных процессов показал, что наилучший переходный процесс по задающему воздействию обеспечивает система автоматического управления на базе МРС регулятора.

Далее в систему было внесено 30 % ступенчатое возмущающее воздействие в момент времени 504 секунды. Полученные переходные процессы по возмущающему воздействию приведены на рисунке 38.

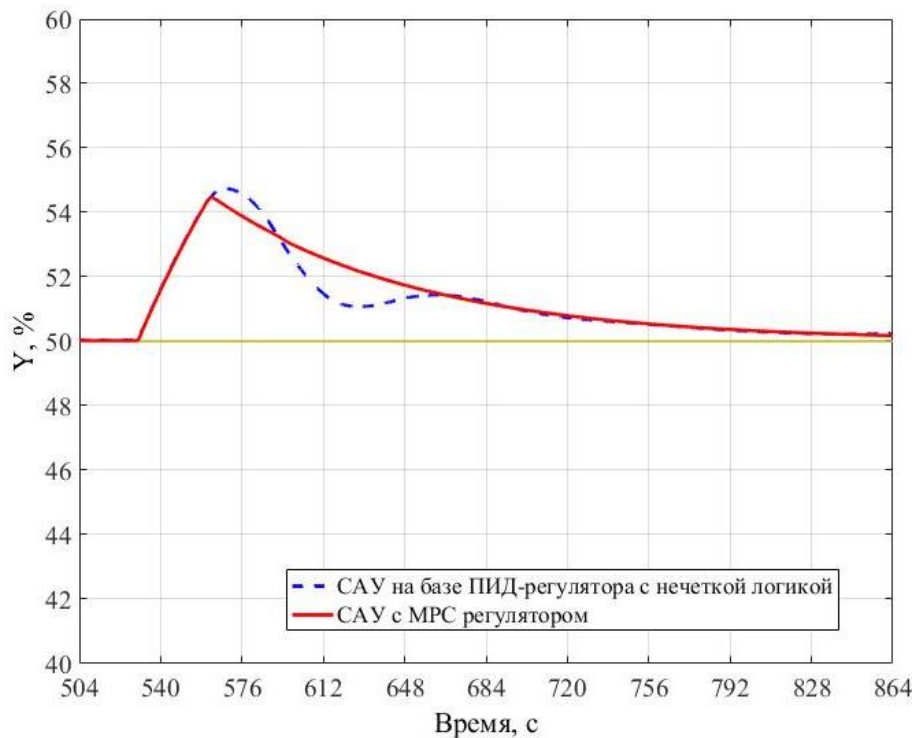


Рисунок 38 – Переходные процессы при 30 % ступенчатом возмущающем воздействии

Для полученных переходных процессов (рисунок 38) были определены показатели качества переходных процессов системы автоматического управления по возмущающему воздействию.

Время регулирования САУ на базе ПИД-регулятора с нечеткой логикой составило 99 секунд, а с МРС регулятором 115 секунд. Для оценки максимального отклонения контролируемой переменной от установившегося значения было рассчитано относительное максимальное отклонение по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{y_{\max}}{g} \cdot 100[\%], \quad (37)$$

где  $y_{\max}$  – максимальное отклонение контролируемой переменной,  $g$  – заданное значение контролируемой переменной (уставка).

Результаты расчетов были сведены в таблицу 8. Также для переходных процессов, представленных на рисунке 38, был рассчитан интегральный

квадратичный критерий ( $QIC$ ) качества переходных процессов с помощью выражения (36).

Таблица 8 – Показатели качества переходных процессов

| Регулятор                        | Относительное максимальное отклонение, $\sigma$ (%) | $QIC$             |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------|
| ПИД-регулятор с нечеткой логикой | 9,48                                                | $1,09 \cdot 10^3$ |
| МРС регулятор                    | 8,92                                                | $1,16 \cdot 10^3$ |

На основе анализа полученных значений показателей качества переходных процессов можно сделать вывод о том, что САУ на базе ПИД-регулятора с нечеткой логикой отрабатывает возмущающее воздействие несколько лучше, чем МРС регулятор.

В момент времени 2988 секунд в систему было внесено 30 % ступенчатое возмущающее воздействие и изменен порядок передаточной функции объекта управления с первого на третий. В виду того, что регуляторы были настроены для объекта управления, описываемого передаточной функцией первого порядка, то качество управления несколько ухудшилось, по сравнению с переходными процессами, представленными на рисунке 38. Полученные переходные процессы показаны на рисунке 39. Как можно заметить (рисунок 39), переходные процессы отличаются наличием колебаний контролируемой переменной.

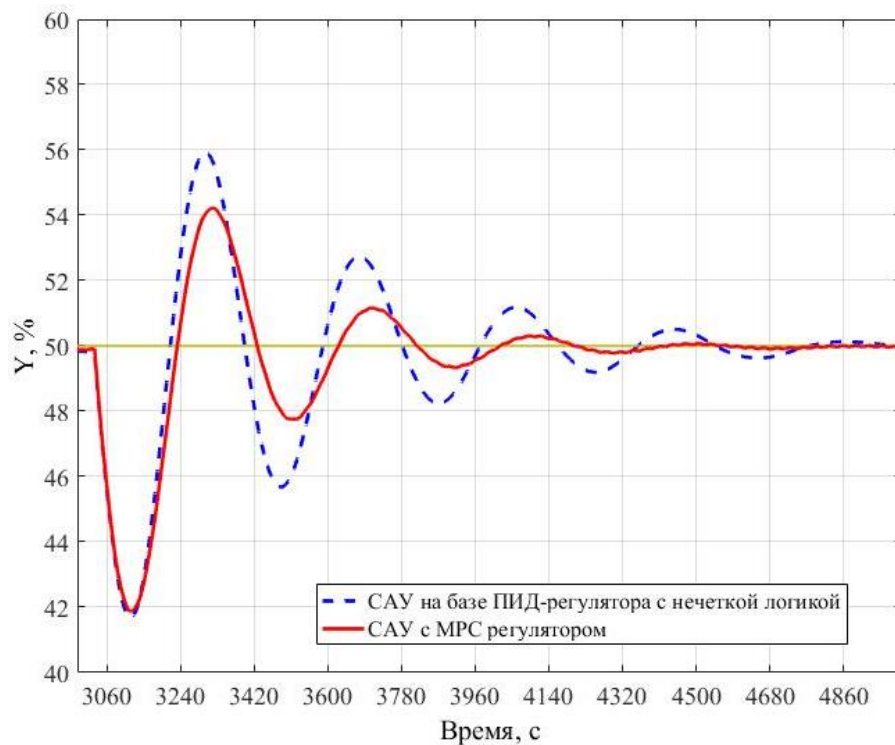


Рисунок 39 – Переходные процессы при 30 % ступенчатом возмущающем воздействии и новых параметрах объекта управления

Время регулирования САУ на базе ПИД-регулятора с нечеткой логикой составило 704 секунды, а с MPC регулятором – 379 секунд. Относительное максимальное отклонение контролируемой переменной от заданного значения было рассчитано с помощью выражения (37), а интегральный квадратичный критерий (*QIC*) качества переходных процессов был определен с помощью выражения (36).

Кроме того, была рассчитана степень затухания колебаний, для оценки колебательных переходных процессов по возмущающему воздействию. Для этого было использовано следующее выражение:

$$\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1}, \quad (38)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды двух соседних колебаний, направленных в одну сторону. Результаты расчетов сведены в таблицу 9.

Таблица 9 – Показатели качества переходных процессов

| Регулятор                           | Относительное<br>максимальное<br>отклонение, $\sigma$ (%) | Степень<br>затухания, $\psi$ | $QIC$             |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------|
| ПИД-регулятор с<br>нечеткой логикой | 16,62                                                     | 0,48                         | $1,26 \cdot 10^4$ |
| МРС регулятор                       | 16,26                                                     | 0,72                         | $9,5 \cdot 10^3$  |

Рассчитанные показатели качества переходных процессов (рисунок 39) численно подтверждают, что САУ с МРС регулятором обладает значительно лучшим качеством управления. Таким образом, в ходе исследования показано, что система управления на базе МРС регулятора лучше отрабатывает управляющие и возмущающие воздействия.

На основании проведенных исследований и литературного обзора был сделан вывод о том, что для управления объектами, которые описываются передаточной функцией первого порядка, целесообразно применять ПИД-регулятор либо ПИД-регулятор дополненный нечеткой логикой. Этот регулятор более прост с точки зрения практической реализации, требует меньше вычислительных мощностей, при этом обеспечивает требуемое качество управления. Однако для управления объектами, поведение которых описывается передаточной функцией второго и выше порядка, а также для сложных динамических объектов, с изменяющимися параметрами передаточной функции, целесообразно использовать регулятор на базе прогнозирующей модели (МРС регулятор).

В виду сложности электроэрозионного процесса водоочистки, а также учитывая результаты сравнения МРС регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой, для управления электроэрозионной водоочистной установкой был выбран МРС регулятор.

### **3.3.2 Общие сведения о методе управления на базе прогнозирующих моделей**

Системы управления на базе прогнозирующих моделей получили широкое распространение за последние 30 лет. Анализом и синтезом таких систем управления занимается теория управления динамическими объектами с использованием прогнозирующих моделей – Model Predictive Control (MPC). Общепринятое название регулятора на базе прогнозирующей модели – MPC регулятор.

Метод управления технологическими процессами с использованием их математических моделей начал развиваться в начале 60-х годов прошлого столетия [136-137]. Впервые этот подход был использован для управления технологическими процессами нефтехимического производства, для которых затруднительно применение классических методов. Изначально, идея управления с помощью прогнозирующих моделей появилась в рамках двух не связанных между собой подходов. Первый подход назывался Dynamics Matrix Control (DMC) и был разработан специалистами компании Shell Oil [138-139], а второй подход Model Algorithmic Control (MAC) – был разработан французскими специалистами для химической промышленности [140]. Общим для этих подходов является то, что в них используется динамическая модель процесса управления для прогнозирования влияния будущих управляющих воздействий с учетом текущего состояния процесса управления, при этом происходит оптимизация управляющего воздействия. В дальнейшем Рафал и Стивенс представили Model Predictive Control (MPC) алгоритм, основанный на минимизации квадрата сигнала рассогласования, с изменяющимися горизонтами предсказания и управления [141]. Данный алгоритм был разработан в результате синтеза системы управления дистилляционной колонной. В последующие годы интерес исследователей к применению MPC подхода стал расти [142-145]. В настоящее время MPC

подход интенсивно развивается, что подтверждает большая библиография научных работ, опубликованных за последние годы [109-114, 146-148].

Упрощенная функциональная схема системы управления с МРС регулятором представлена на рисунке 40. Основная идея МРС подхода заключается в следующем, имеется вход объекта по управлению  $u(t)$  и выходная контролируемая переменная  $y(t)$ . Переменной  $g(t)$  задается желаемая величина изменения контролируемой переменной. На технологический объект управления действует возмущающее воздействие  $f(t)$ .

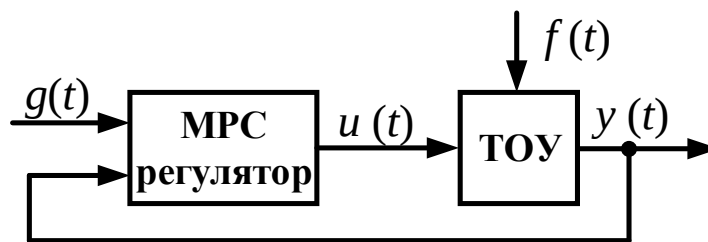


Рисунок 40 – Упрощенная функциональная схема системы управления с МРС регулятором

Как правило, МРС регулятор состоит из прогнозирующей модели, она же математическая модель объекта управления, и оптимизатора. Структурная схема МРС регулятора представлена на рисунке 41.

Рассмотрим систему управления в дискретном времени, то есть только в моменты времени  $t=k \cdot \Delta T$ , при этом  $\Delta T$  – некоторый период квантования, а  $k$  – некоторое целое число. Для удобства графического представления будем считать  $\Delta T=1$ .

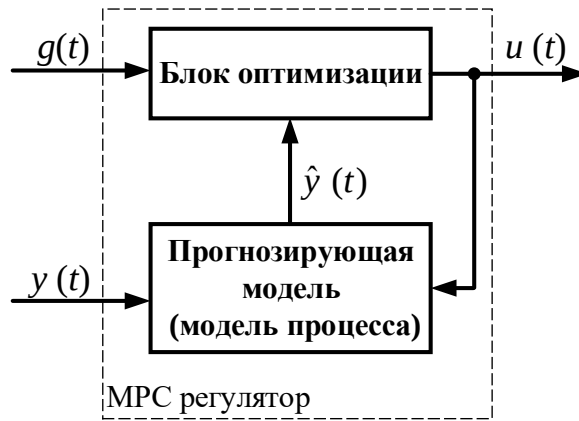


Рисунок 41 – Структурная схема MPC регулятора

На рисунке 42 графически представлена идея управления на базе прогнозирующей модели. Значения контролируемой переменной  $y(t)$ , предсказанные в некоторый момент времени  $t$ , обозначены следующим образом  $\hat{y}(t)$ . Горизонт предсказания строится на определенное число тактов. Прогнозируемая траектория контролируемой переменной будет зависеть от будущих значений управляющего воздействия  $u(t)$ .

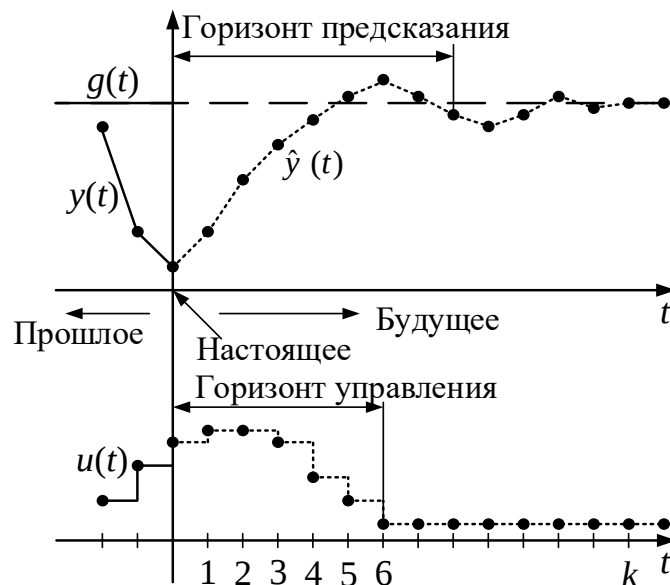


Рисунок 42 – Графическое представление идеи управления с прогнозирующей моделью

Суть метода заключается в нахождении некоторой последовательности значений управляющей переменной  $u(t)$ , которая позволит обеспечить

наилучшую прогнозируемую траекторию для контролируемой переменной. Длина последовательности рассчитываемых управляющих воздействий  $u(t)$  является фиксированной величиной и называется горизонтом управления. Искомая последовательность значений управляющего воздействия определяется в результате решения некоторой задачи оптимизации. Выбор наилучшей траектории контролируемой переменной определяется показателями качества управления.

Как правило, применяется показатель качества, который содержит квадрат рассогласования между прогнозируемой выходной переменной объекта управления  $\hat{y}(t)$  и желаемой траекторией  $g(t)$ . При выборе оптимальных значений управляемой переменной  $u(t)$ , регулятор стремится минимизировать функционал, представленный выражением вида:

$$J = Q \cdot \sum_{i=0}^p (g(t+i) - \hat{y}(t+i))^2 + R \cdot \sum_{i=0}^m (u(t) - u(t+i))^2, \quad (39)$$

где  $Q$  и  $R$  – весовые коэффициенты,  $p$  – число тактов, на которых строится прогноз поведения контролируемой переменной  $y(t)$  (горизонт предсказания),  $m$  – длина последовательности будущих значений управляющего воздействия  $u(t)$  (горизонт управления).

После подачи на объект управления первого элемента вычисленной оптимальной последовательности управляющего воздействия  $u(t)$ , на следующем такте вся процедура повторяется заново, с учетом вновь поступившей информации. Таким образом функционирует МРС регулятор.

При настройке МРС регулятора руководствуются следующим:

- выбирается максимально широкий горизонт прогноза, который ограничивается вычислительными возможностями решения уравнений модели на таком промежутке;
- горизонт управления выбирают в интервале 15-20 % от горизонта предсказания;

- при необходимости накладываются ограничения на управляющие воздействия;

- задаются весовые коэффициенты  $Q$  и  $R$ , исходя из значимости каждой цели управления и необходимости масштабирования слагаемых функционала, с целью приведения их к одному порядку (к одной шкале).

Основной особенностью управления с прогнозирующей моделью является наличие математической модели объекта управления, которая достаточно точно описывает его поведение. Наличие адекватной математической модели объекта управления позволяет прогнозировать значения контролируемой переменной на определенное число шагов вперед.

Для синтеза MPC регулятора было произведено упрощение разработанной ранее математической модели электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления.

### **3.3.3 Упрощенная математическая модель объекта управления**

Метод математического моделирования достаточно давно и успешно используется при разработке автоматизированных систем управления. Наличие адекватной математической модели объекта управления позволяет без проведения экспериментальных исследований изучить влияние тех или иных входных переменных на поведение выходной (контролируемой) переменной. Такой подход часто используется для сложных технологических процессов, для которых проведение экспериментальных исследований невозможно из-за особенностей протекания процесса, повышенной взрыво- и пожароопасности либо экономически не выгодно. Для исследования объекта управления с помощью моделирования, как правило, разрабатывают математические модели, которые базируются на сложных физико-химических теориях и законах. Тем самым учитывается влияние выделенных входных переменных на выходные переменные. В зарубежной литературе такие модели называются First Principle Model [149-151].

На рисунке 43 представлена схема, демонстрирующая использование First Principle Model для разработки систем управления.

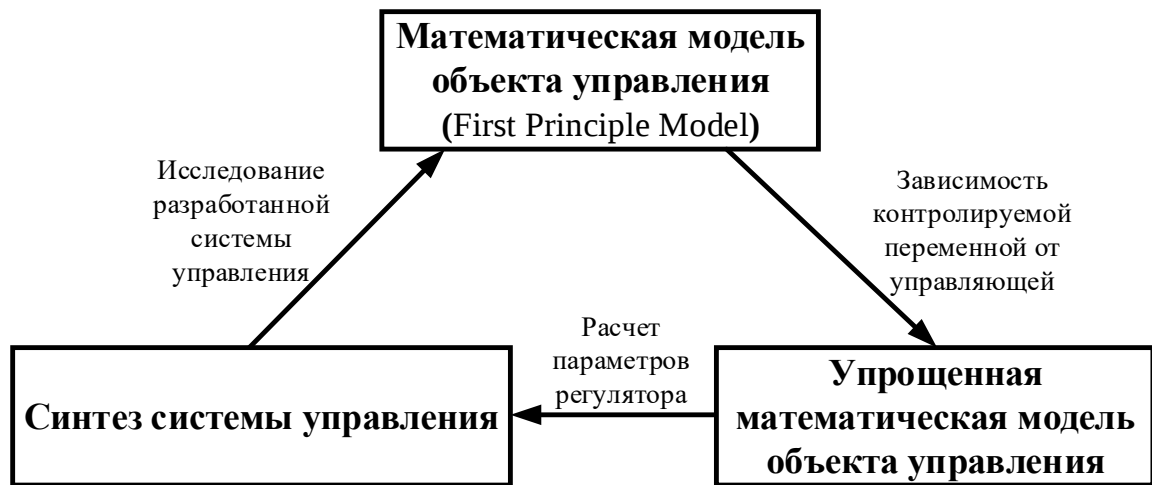


Рисунок 43 – Схема использования математической модели объекта управления для разработки систем управления

First Principle Model или модели учитывающие физические и химические законы часто используются для выявления зависимости контролируемой переменной от управляющей переменной. Выявленная зависимость называется упрощенной математической моделью объекта управления. Используя упрощенную математическую модель объекта управления производят синтез систем управления и расчет параметров, используемого регулятора. Для исследования разработанной системы управления используется математическая модель объекта управления, основанная на физических и химических законах (First Principle Model), так как более точно описывает динамику и поведение объекта управления.

Математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды, была разработана ранее и представлена в Главе 2. В основе разработанной математической модели лежит метод вероятностных клеточных автоматов. Однако, использование этой модели для синтеза MPC регулятора имеет определенные трудности, в связи с этим, необходимо разработать упрощенную математическую модель электроэрозионного процесса очистки воды, как объекта управления.

С целью определения рабочей точки электроэрозионной водоочистной установки была проведена серия экспериментов на созданной модели для получения статической характеристики по каналу управления, то есть напряжение подаваемых электрических импульсов  $\rightarrow$  концентрация продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе. Производилось моделирование электроэрозионного процесса очистки воды производительностью  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Исходные и экспериментальные данные были взяты из литературных источников [71]. Полученная статическая характеристика представлена на рисунке 44.

Как видно из полученной зависимости (рисунок 44), электроэрозионный процесс очистки воды имеет нелинейную статическую характеристику по каналу управления. При  $0 \leq U_{\text{имп.}} \leq 200 \text{ В}$  не происходит образование продуктов электрической эрозии. Это объясняется тем, что напряжения подаваемых электрических импульсов недостаточно для создания в межэлектродном пространстве водоочистной установки напряженности поля больше критической напряженности (14), необходимой для возникновения разрядов между металлическими шариками загрузки.

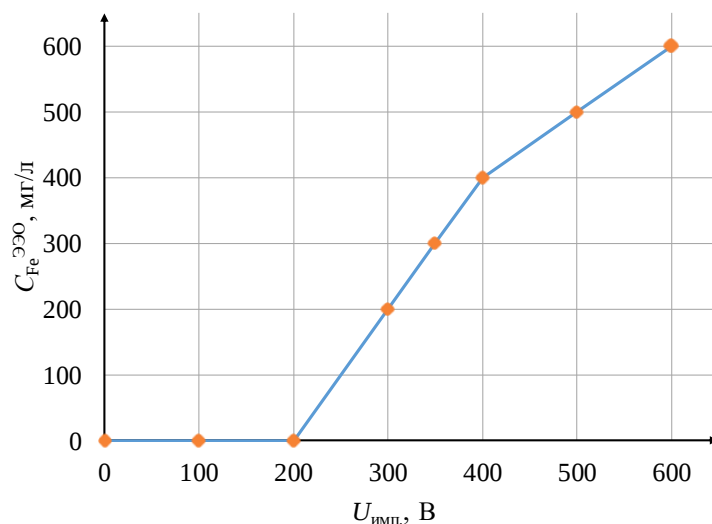
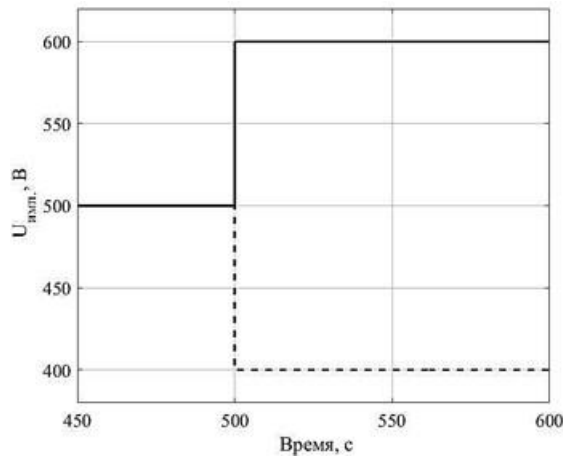


Рисунок 44 – Статическая характеристика электроэрозионной водоочистной установки по каналу управления

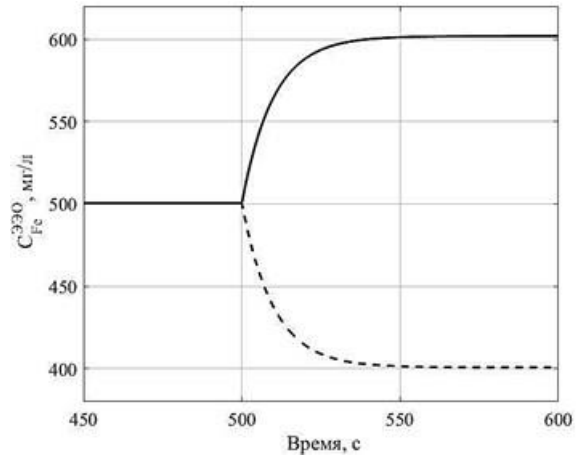
При увеличении  $U_{\text{имп.}}$  возрастает и концентрация образующихся продуктов электрической эрозии. Из-за технических особенностей используемого генератора электрических импульсов максимально возможное напряжение подаваемых электрических импульсов равно 600 В. Учитывая статическую характеристику объекта управления был выделен рабочий интервал подаваемых электрических импульсов  $400 \leq U_{\text{имп.}} \leq 600$  В.

Упрощённая математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды должна описывать зависимость контролируемой переменной от управляющей переменной. Для установления этой зависимости, с помощью разработанной ранее математической модели процесса, была получена реакция объекта управления на ступенчатое управляющее воздействие. Переходные характеристики снимались в окрестности рабочей точки процесса как при положительных, так и отрицательных скачках управляющего воздействия. Величина скачкообразного воздействия выбиралась максимальной из линейной рабочей области статической характеристики объекта управления.

Согласно информационной структуре электроэрозионной водоочистной установки как объекта управления (рисунок 4), управляющей переменной является напряжение подаваемых электрических импульсов ( $U_{\text{имп.}}$ ), а контролируемой переменной – концентрация образовавшихся продуктов электроэрозии ( $C_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}$ ). На рисунке 45 представлена переходная функция (кривая разгона) электроэрозионной водоочистной установки и ступенчатое управляющее воздействие, которое составило  $\Delta U_{\text{имп.}} = \pm 100$  В.



Ступенчатое управляющее воздействие



Переходная функция

Рисунок 45 – Результаты моделирования

Для определения параметров передаточной функции исследуемого процесса был использован метод Орманса [152]. В результате вычислений было определено, что электроэрозионный процесс очистки воды по каналу управления может быть описан инерционным звеном 2 порядка с разными постоянными времени:

$$W_{об}(s) = \frac{k_{об}}{(T_{об1} \cdot s + 1) \cdot (T_{об2} \cdot s + 1)}, \quad (40)$$

где  $k_{об}$  – коэффициент передачи объекта;  $T_{об1}$ ,  $T_{об2}$  – постоянные времени объекта управления.

Параметры объекта равны:  $k_{об} = 1,0025$ ,  $T_{об1} = 9,135$ ,  $T_{об2} = 0,865$ .

Для проверки адекватности полученной упрощенной математической модели электроэрозионного процесса водоочистки было произведено сопоставление кривой разгона, полученной с помощью полной модели (First Principle Model) и переходной функции, полученной с помощью упрощенной модели. Результаты представлены на рисунке 46.

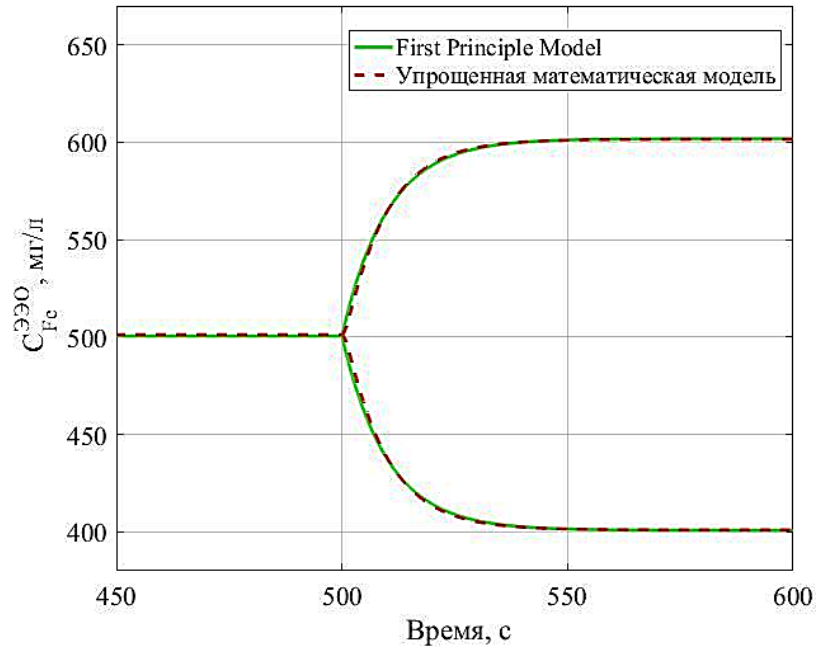


Рисунок 46 – Кривая разгона и переходная функция, полученная с помощью упрощенной модели

Для численной оценки адекватности, полученной упрощенной математической модели объекта управления, было рассчитано приведенное среднеквадратическое отклонение по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{исх}}(t_i) - y_{\text{расч}}(t_i))^2}{n-1}} \cdot 100\%, \quad (41)$$

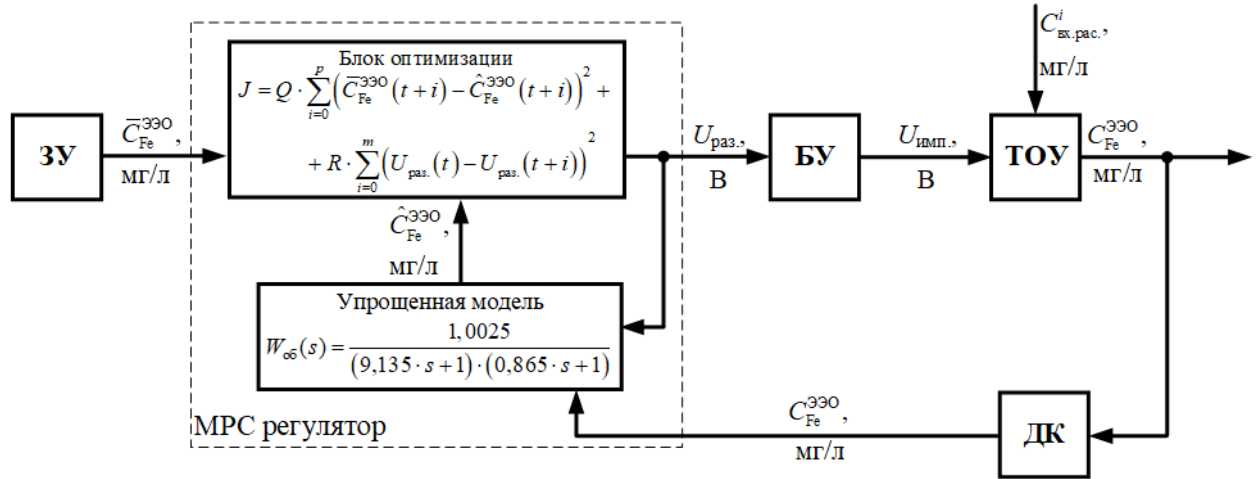
$$y(\infty) - y(0)$$

где  $y_{\text{исх}}(t_i)$  – значения контролируемой переменной, полученные с помощью полной модели (First Principle Model);  $y_{\text{расч}}(t_i)$  – значения контролируемой переменной, полученные с помощью упрощенной модели объекта управления;  $n$  – количество элементов;  $y(0)$  – значение контролируемой переменной в начальный момент времени;  $y(\infty)$  – значение контролируемой переменной в установившемся режиме.

В результате расчетов было получено приведенное среднеквадратическое отклонение  $\delta = 1,3 \%$ . Это позволяет считать упрощенную математическую модель объекта управления адекватной и использовать в дальнейшей работе, при параметрическом синтезе MPC регулятора.

### 3.3.4 Параметрический синтез MPC регулятора

Функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой на базе MPC регулятора представлена на рисунке 47 [17, 18].



ЗУ – задающее устройство, БУ – блок управления, ТОУ – технологический объект управления, ДК – датчик концентрации продуктов электрической эрозии

Рисунок 47 – Функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой на базе MPC регулятора

Параметрический синтез MPC регулятора был осуществлен в пакете MatLab/Simulink, с помощью инструмента Model Predictive Control Toolbox. Для настройки регулятора использовалась упрощённая математическая модель объекта управления:

$$W_{об}(s) = \frac{1,0025}{(9,135 \cdot s + 1) \cdot (0,865 \cdot s + 1)}. \quad (42)$$

На управляющее воздействие, формируемое MPC регулятором, были наложены ограничения, обусловленные статической характеристикой (рисунок 44) электроэрозионного процесса как объекта управления и выбором рабочего участка. В результате напряжение подаваемых электрических импульсов может изменяться в интервале  $400 \leq U_{имп.} \leq 600$  В.

MPC регулятор, реализованный в пакет MatLab/Simulink, стремится минимизировать функционал, представленный выражением (39). Однако весовые коэффициенты этого функционала, в пакете MatLab/Simulink, реализованы в виде выражений следующего вида:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{q_y}{S_y}, \\ R &= \frac{r_u}{S_u}, \end{aligned} \tag{43}$$

где  $q_y$  – коэффициент определяющий вес слагаемого, содержащего квадрат рассогласования между прогнозируемой контролируемой переменной объекта управления и желаемым значением контролируемой переменной (уставкой);  $r_u$  – коэффициент определяющий вес слагаемого, содержащего квадрат приращения управляющего воздействия;  $S_y$  и  $S_u$  – масштабные коэффициенты, используемые для приведения слагаемых функционала к одному порядку (к одной шкале).

Масштабные коэффициенты высчитываются пакетом MatLab/Simulink, а пользователь задает  $q_y$  и  $r_u$ , исходя из цели управления и основываясь на рекомендации по настройке MPC регулятора, представленные в справочных материалах пакета MatLab/Simulink. Основываясь на справочные материалы по настройке MPC регулятора, весовые коэффициенты были заданы следующими значениями  $q_y = 5,0$  и  $r_u = 0,1$ . Такие значения коэффициентов позволяют обеспечить приоритет по отслеживанию отклонения контролируемой переменной от уставки выше среднего и при этом обеспечивается небольшое (умеренное) приращение управляющей переменной. В результате была получена структура MPC регулятора в пакете MatLab/Simulink.

Далее было произведено исследование разработанной системы управления на базе MPC регулятора с помощью полной математической модели (First Principle Model) объекта управления.

### 3.4 Исследование разработанной системы управления с помощью компьютерного моделирования

Разработанные система управления и математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды были реализованы в виде программного кода в пакете MatLab. Исходные и экспериментальные данные для моделирования процесса электроэрозионной очистки воды с разработанной системой управления были взяты из литературных источников [71].

Производилось моделирование электроэрозионного процесса очистки воды производительностью  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Расходы водного раствора на входе и на выходе из установки равны и составляют  $0,278 \text{ л/с}$ . Обрабатываемая вода пребывает в баке-реакторе порядка  $10 \text{ с}$ , а объем обрабатываемой воды составляет  $2,78 \text{ л}$ . Масса загруженных металлических шариков составляет  $1,5 \text{ кг}$ . Обработка металлической загрузки производится электрическими импульсами со следующими параметрами:  $400 \leq U_{\text{имп.}} \leq 600 \text{ В}$ ,  $t_{\text{имп.}} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ,  $f_{\text{имп.}} = 700 \text{ Гц}$ .

Используя разработанную компьютерную модель было произведено определение оптимальных параметров МРС регулятора, а именно горизонта предсказания ( $p$ ) и горизонта управления ( $m$ ). Результаты моделирования при изменении горизонта предсказания ( $p = 5, 10, 15, 20$ ) и фиксированном горизонте управления ( $m = 2$ ) представлены на рисунке 48.

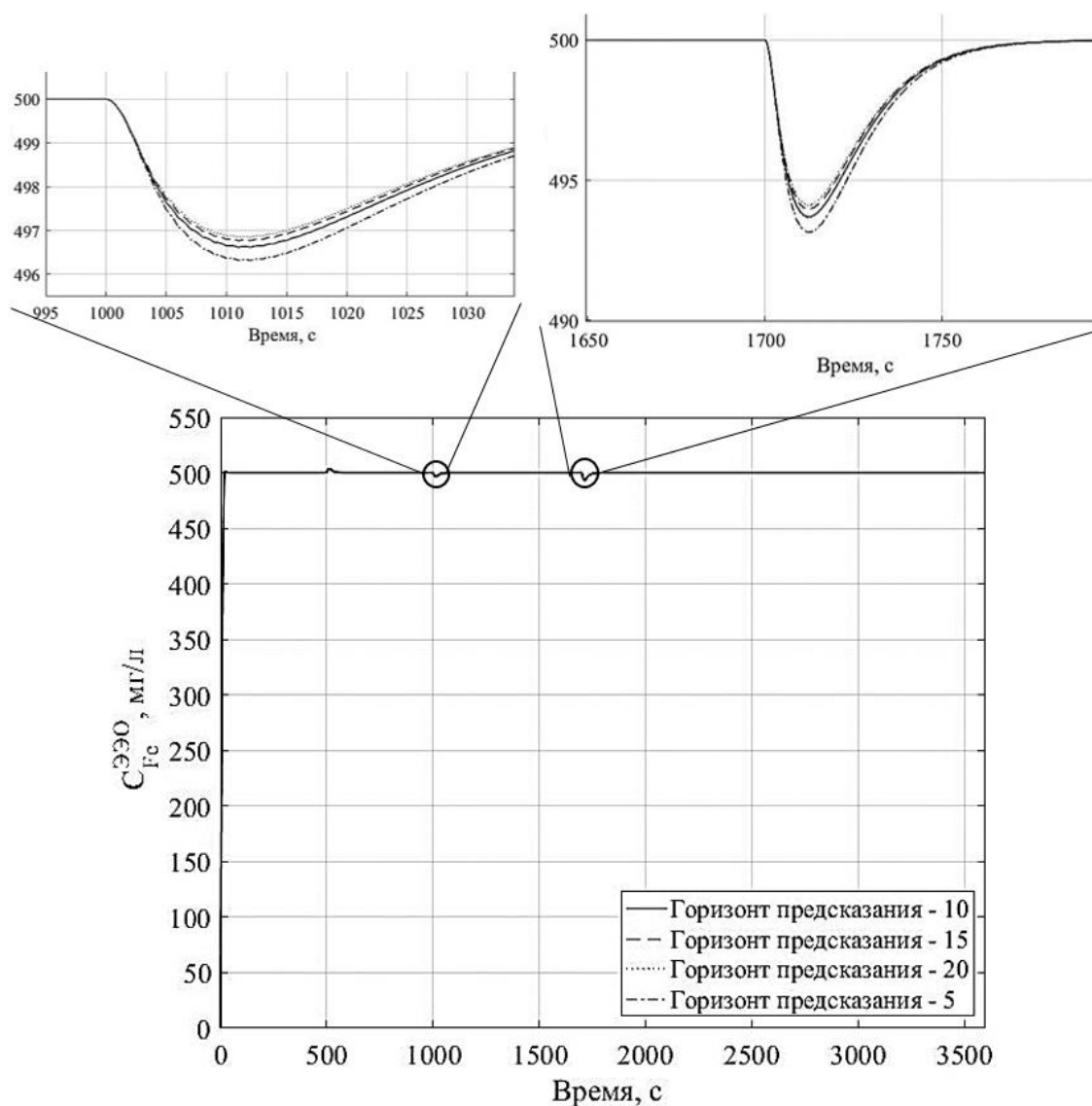


Рисунок 48 – Результаты моделирования при варьировании горизонта предсказания

Из полученных графиков (рисунок 48) видно, что при горизонте предсказания равном 5 качество управления ухудшается, хотя и незначительно. При увеличении горизонта предсказания максимальное отклонение управляемой переменной уменьшается. Однако исходя из требуемых вычислительных мощностей для функционирования МРС регулятора целесообразно выбрать горизонт предсказания равным 10, так как дальнейшее увеличение горизонта предсказания существенно не уменьшает максимальное отклонение управляемой переменной.

Результаты моделирования при изменении горизонта управления ( $m = 1, 2, 5, 8$ ) и фиксированном горизонте предсказания ( $p = 10$ ) представлены на рисунке 49.

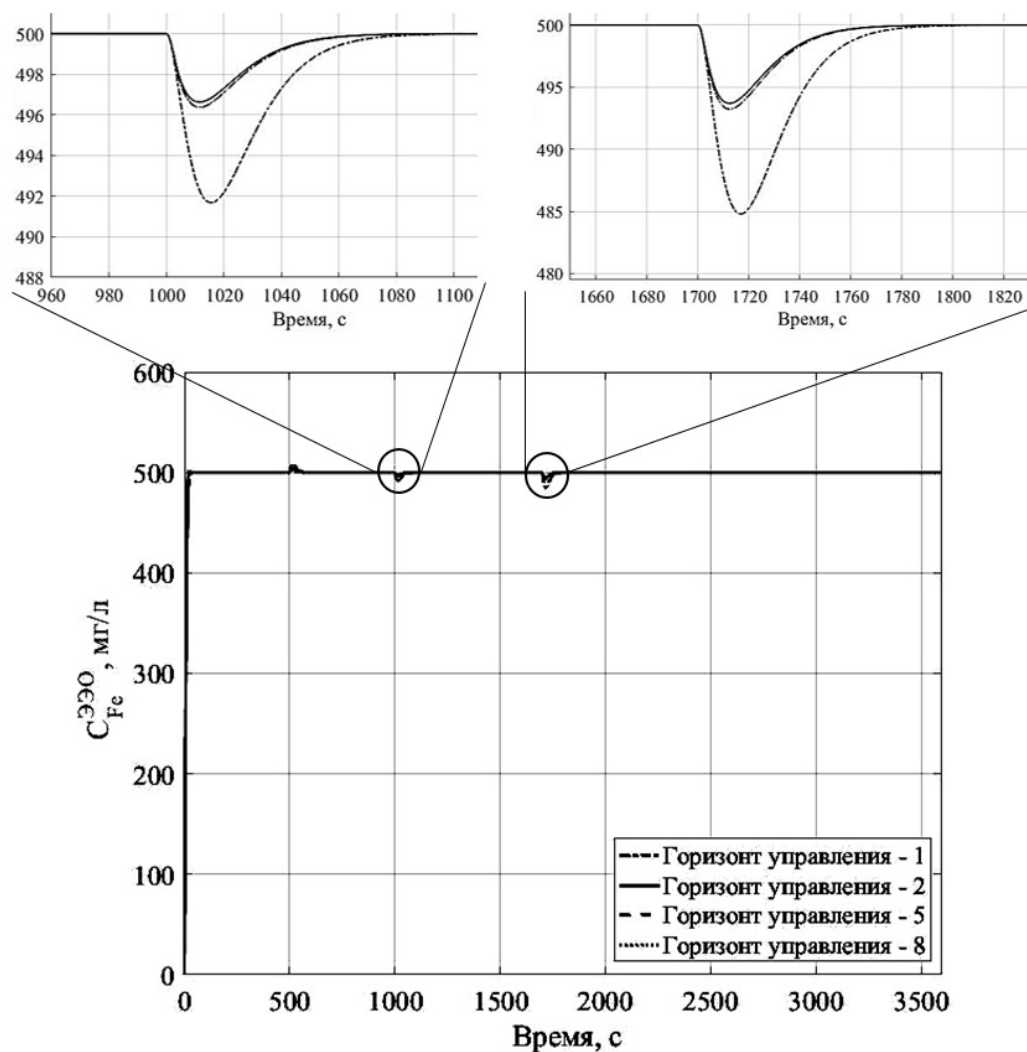
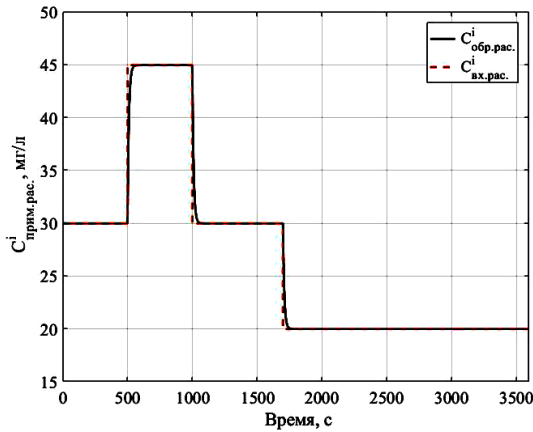


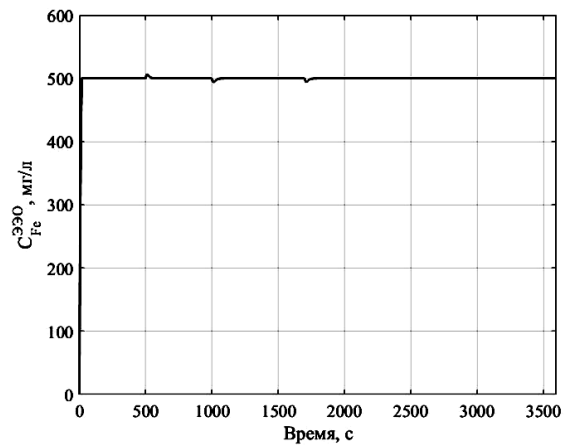
Рисунок 49 – Результаты моделирования при варьировании горизонта управления

Из полученных графиков (рисунок 49) видно, что при горизонте управления равном 1 качество управления ухудшается. При увеличении горизонта управления максимальное отклонение управляемой переменной уменьшается. При этом минимальное отклонение управляемой переменной достигается при горизонте управления равном 2.

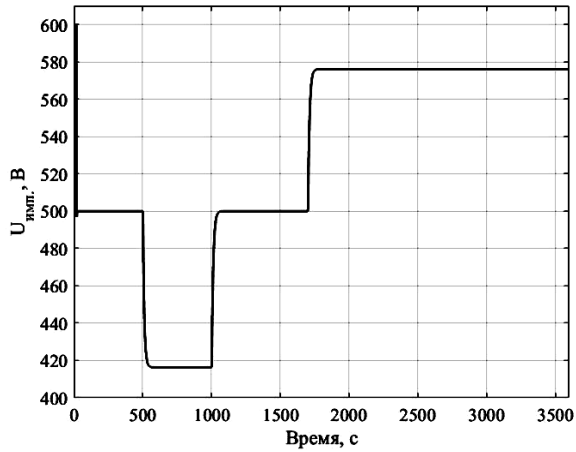
Результаты моделирования работы электроэрозионной водоочистной установки с разработанной системой управления представлены на рисунке 50.



Изменение концентрации вредных примесей в очищаемом водном растворе на входе в аппарат и в аппарате



Изменение концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе



Изменение напряжения подаваемых электрических импульсов

Рисунок 50 – Результаты моделирования

Как видно из полученных результатов моделирования (рисунок 50), использование разработанной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой на базе МРС регулятора позволяет удерживать концентрацию продуктов электрической эрозии на постоянном уровне. Для этого производится варьирование напряжения подаваемых электрических импульсов. Отклонения контролируемой переменной от требуемого значения не превышают 5 %.

### 3.5 Выводы по главе

Третья глава посвящена разработке автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой.

В ходе диссертационного исследования, на основании анализа электроэрозионного процесса как объекта управления, была разработана функциональная схема автоматизированной системы управления. Контролируемой переменной является концентрация образовавшихся продуктов электрической эрозии, а управляющей переменной является напряжение подаваемых электрических импульсов.

Для измерения текущего значения контролируемой переменной процесса был разработан оптический датчик концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе. Разработанный датчик основан на спектрофотометрическом методе.

На основании проведенного литературного обзора [129-135], а также в результате собственного исследования, по сравнению ПИД-регулятора с нечеткой логикой и МРС регулятора [14], был сделан вывод о целесообразности применения МРС регулятора в автоматизированной системе управления электроэрозионной водоочистной установкой.

Основной особенностью системы управления с МРС регулятором является наличие математической модели объекта управления, которая достаточно точно описывает его поведение. Математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды была разработана ранее и представлена в Главе 2. Однако, использование этой модели для синтеза МРС регулятора имеет определенные трудности, в связи с этим, возникла необходимость разработать упрощенную математическую модель электроэрозионного процесса очистки воды, как объекта управления. Для этого, с помощью разработанной ранее математической модели процесса, была получена статическая характеристика электроэрозионной водоочистной установки по каналу управления (рисунок 44). Полученная характеристика

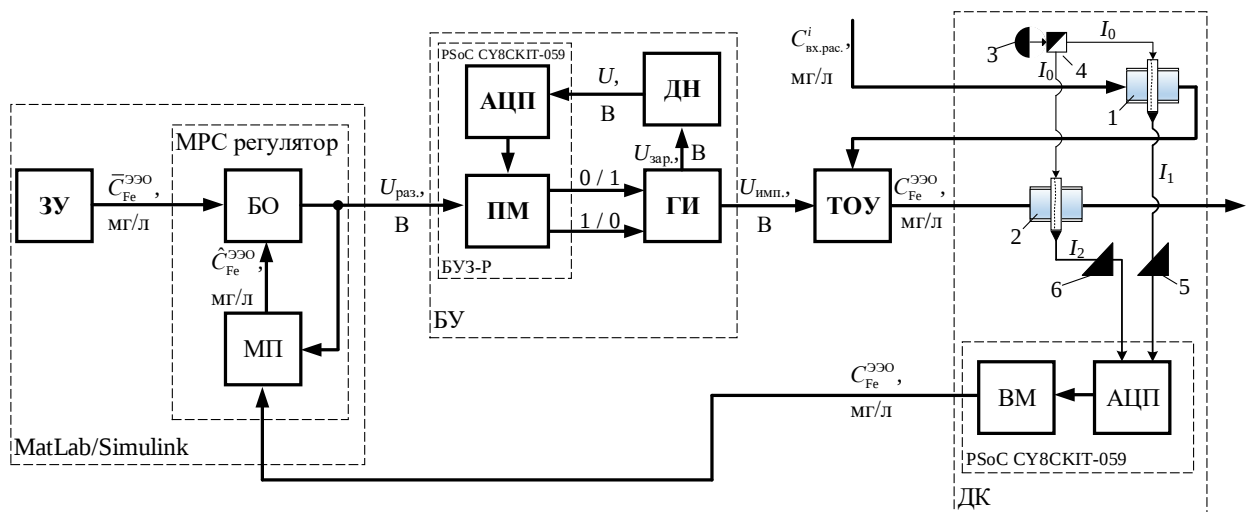
является нелинейной. Учитывая статическую характеристику объекта управления и технические особенности генератора электрических импульсов был выделен рабочий интервал подаваемых электрических импульсов  $400 \leq U_{\text{имп.}} \leq 600$  В. С помощью разработанной ранее математической модели процесса, была получена реакция объекта управления на ступенчатое управляющее воздействие. Переходные характеристики снимались в окрестности рабочей точки процесса. Для определения параметров передаточной функции исследуемого процесса был использован метод Орманса. В результате электроэрозионный процесс очистки воды по каналу управления был описан инерционным звеном 2-го порядка с разными постоянными времени.

Используя упрощенную математическую модель процесса был произведён параметрический синтез МРС регулятора. С помощью компьютерного моделирования было произведено исследование разработанной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой. В результате исследования было показано, что использование МРС регулятора позволяет удерживать на заданном уровне контролируемую переменную. Также были определены оптимальные значения горизонта предсказания ( $p = 10$ ) и горизонта управления ( $m = 2$ ) для МРС регулятора.

## 4 Обобщение и практическое применение результатов диссертационного исследования

### 4.1 Реализация автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой

Функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой на базе МРС регулятора представлена на рисунке 51.



ЗУ – задающее устройство, БО – блок оптимизации, МП – модель процесса, БУ – блок управления, БУЗ-Р – блок управления зарядом/разрядом, ПМ – программный модуль, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ГИ – генератор электрических импульсов, ДН – датчик напряжения, ТОУ – технологический объект управления (бак-реактор), ДК – датчик концентрации продуктов электрической эрозии, ВМ – вычислительный модуль, 1 – эталонная кювета, 2 – измерительная кювета, 3 – широкополосный оптический излучатель, 4 – разветвитель светового сигнала, 5 и 6 – фотоприемники

Рисунок 51 – Функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой на базе МРС регулятора

ТОУ представляет из себя аппарат в форме прямоугольного параллелепипеда, выполненный из диэлектрического материала. На

противоположных стенках которого расположено два электрода, подключаемые к ГИ.

В качестве ГИ используется конденсаторная батарея, управляемая тиристорными ключами. Электрическая схема используемого ГИ представлена на рисунке 52.

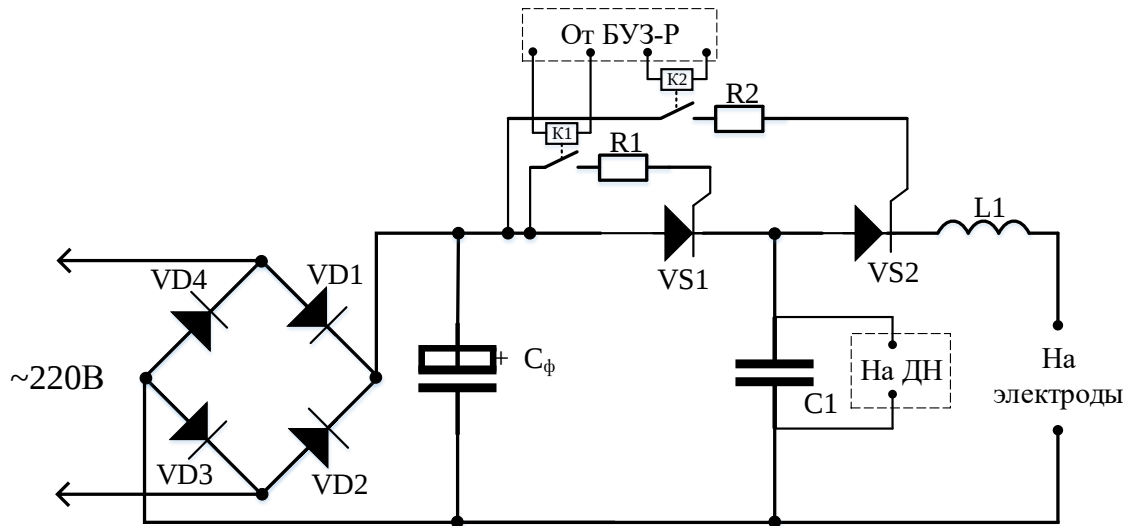


Рисунок 52 – Принципиальная электрическая схема генератора электрических импульсов (ГИ)

С помощью диодного моста (VD1-VD4) и фильтрующего конденсатора ( $C_{\phi}$ ) происходит преобразование переменного сетевого напряжения в постоянное. Далее с помощью тиристоров VS1 и VS2 происходит управление зарядом и разрядом конденсаторной батареи (C1). Когда тиристор VS1 открыт происходит зарядка конденсаторной батареи (C1), после заряда конденсаторной батареи до нужного напряжения тиристор VS1 закрывается. Контроль напряжения заряда на обкладках конденсаторной батареи осуществляется с помощью датчика напряжения (ДН). Затем открывается тиристор VS2 и происходит разрядка конденсаторной батареи на нагрузку в виде металлических шариков, после разрядки батареи тиристор VS2 закрывается. Катушка индуктивности L1 предназначена для ограничения скорости нарастания обратных токов и сохранения работоспособности тиристора VS2. Резисторы R1 и R2 предназначены для ограничения

управляющего тока тиристоров VS1 и VS2. Управление тиристорами осуществляется с помощью твердотельных реле (K1 и K2), через блок управления зарядом-разрядом (БУЗ-Р) конденсаторной батареи.

В качестве датчика напряжения (ДН) используется датчик напряжения LV 25-P/SP5, позволяющий измерять напряжения в диапазоне от 10 до 1500 В. Внешний вид датчика напряжения представлен на рисунке 53.



Рисунок 53 – Датчик напряжения LV 25-P/SP5

Блок управления зарядом-разрядом (БУЗ-Р) конденсаторной батареи выполнен на базе платы PSoC CY8CKIT-059. CY8CKIT-059 PSoC® 5LP Prototyping Kit – отладочная плата программируемой аналого-цифровой однокристальной микропроцессорной системы фирмы Cypress, содержащая микроконтроллерное ядро ARM Cortex-M3, программируемую интегральную схему (ПЛИС), программируемую интегральную аналоговую схему. Внешний вид платы представлен на рисунке 54.



Рисунок 54 – Внешний вид платы PSoC CY8CKIT-059

На основании сигналов, полученных с датчика напряжения (ДН) и от МРС регулятора, реализованного в пакете MatLab/Simulink, происходит формирование управляющих сигналов по алгоритму, реализованному в программном модуле (ПМ) и представленному на рисунке 55.

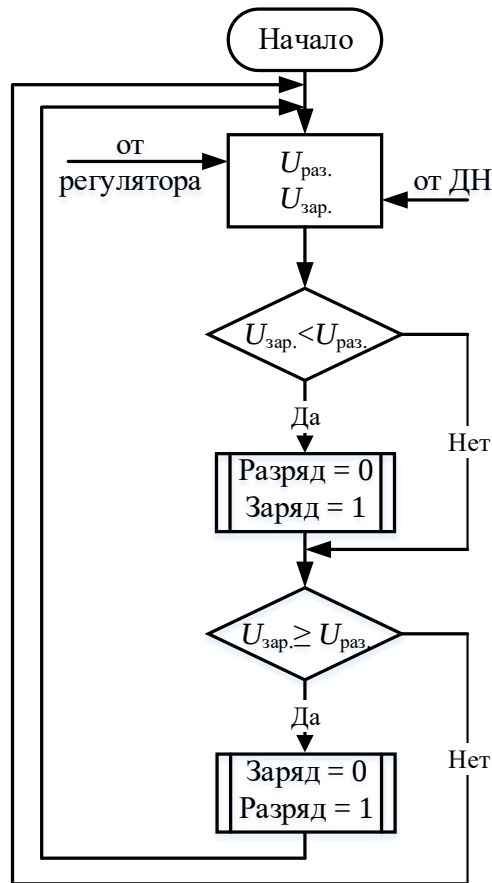


Рисунок 55 – Алгоритм работы блока управления зарядом-разрядом (БУЗ-Р) конденсаторной батареи

Согласно представленному алгоритму (рисунок 55), регулятор рассчитывает величину напряжения (амплитуду) электрических импульсов ( $U_{\text{раз.}}$ ) и передает это значение в БУЗ-Р. В БУЗ-Р происходит сравнение напряжения, рассчитанного регулятором и напряжения, измеренного ДН на обкладках конденсаторной батареи ( $U_{\text{зар.}}$ ). В случае если напряжения равны или на обкладках батареи напряжение больше расчетного – заряд батареи прекращается, если напряжение на обкладках конденсаторной батареи меньше расчётного напряжения, то батарея заряжается до тех пор, пока напряжения не

будут равны. После зарядки батареи до нужного значения происходит формирование управляющего воздействия на разряд батареи.

Взаимодействие платы PSoC CY8CKIT-059 и персонального компьютера осуществляется по средствам UART. На персональном компьютере имеется MatLab/Simulink, в котором реализован MPC регулятор. Подробно о синтезе MPC регулятора написано в Главе 3. Задающее устройство (ЗУ) также реализовано в пакете MatLab/Simulink.

Регулятор рассчитывает требуемую величину напряжения, подаваемых электрических импульсов ( $U_{\text{раз.}}$ ) на основании желаемого значения контролируемой переменной (уставки) и текущего значения контролируемой переменной, в качестве которой выступает концентрация продуктов электрической эрозии ( $C_{\text{Fe}}^{\text{ЭЭО}}$ ). Уставка формируется с помощью задающего устройства, а контролируемая переменная измеряется с помощью датчика концентрации.

В реализованной системе управления используется оптический датчик концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе, описанный в Главе 3. Измерительная и эталонная кюветы выполнены из коррозионностойких материалов, таких как, силикон и PTFE трубки, пригодных для использования в химической промышленности. На рисунке 56 представлена 3-D модель используемых кювет.

Кювета выполнена симметрично. Отверстия (1) предназначены для монтирования патч-кордов оптического шнура. Через отверстия (2) выводится оптический шнур для подключения к источнику света, а через отверстие (3) для подключения к приемнику оптического сигнала. Пространство (4) предназначено для фиксации оптического шнура, который является достаточно ломким в месте соединения с патч-кордом.

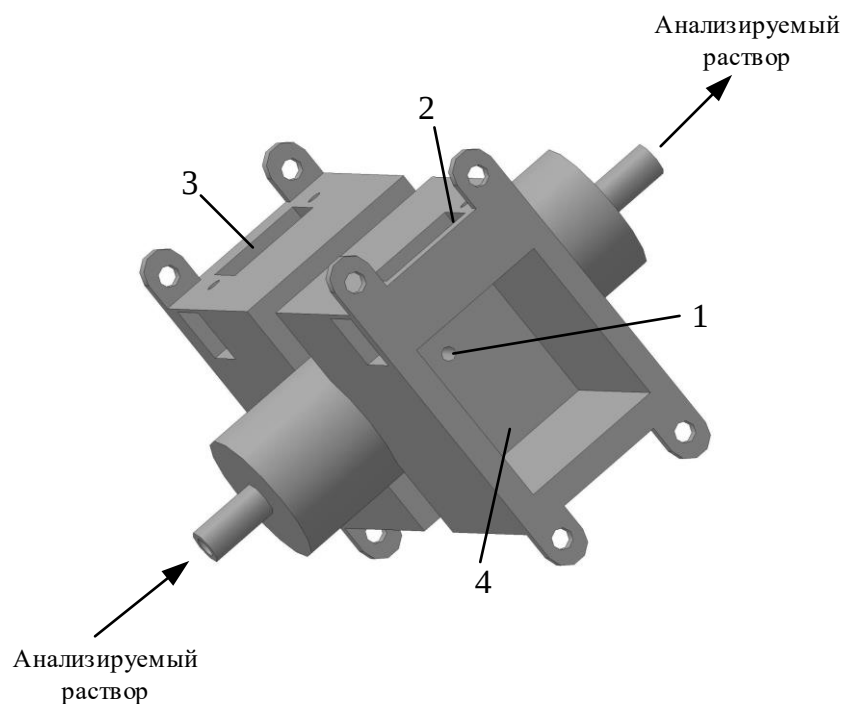


Рисунок 56 – 3-D модель кюветы оптического датчика концентрации

В качестве источника светового потока используется непрерывный диод марки PLT5 488, работающий при длине волны света  $\lambda = 488$  нм. Внешний вид диода представлен на рисунке 57.



Рисунок 57 – Внешний вид диода марки PLT5 488

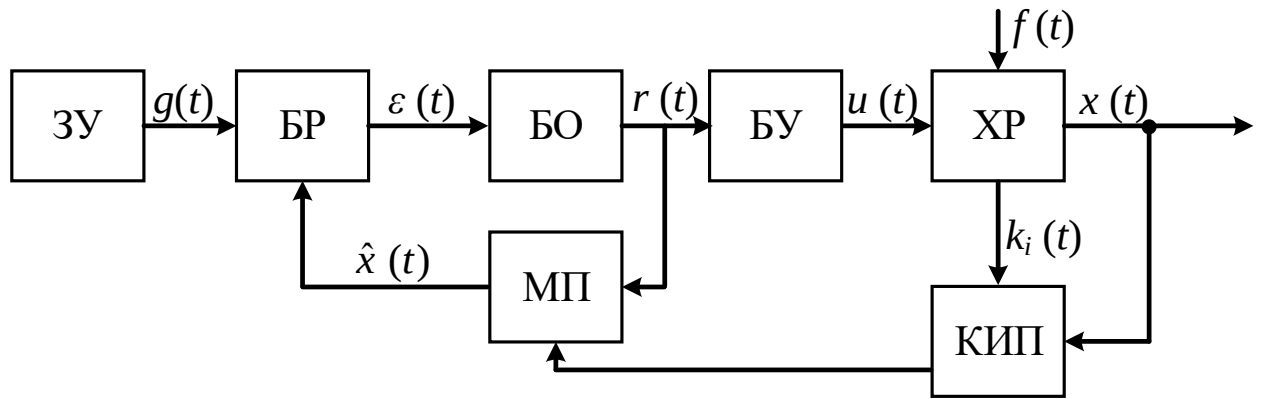
В результате прохождения света через водный раствор происходит его поглощение. В зависимости от концентрации примесей в растворе степень поглощения может быть высокой либо низкой. Пройденный через раствор световой поток регистрируют с помощью фотоприемников 5 и 6. Затем сигнал с фотоприемников 5 и 6 оцифровывается с помощью АЦП и поступает в

вычислительный модуль. АЦП и вычислительный модуль реализованы на базе платы PSoC CY8CKIT-059, взаимодействие которой с персональным компьютером осуществляется посредством UART. В вычислительном модуле осуществляется пересчет интенсивности поглощения в значения концентрации продуктов эрозии, по закону Бугера-Ламберта-Бера (33). Для этого используется эмпирическое значение молярного коэффициента поглощения (экстинкции). Коэффициент экстинкции для железных продуктов электрической эрозии при длине волны пропускаемого света  $\lambda = 488$  нм равен  $\varepsilon = 34800 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Автоматизированная система управления электроэрозионной водоочистой установкой на базе МРС регулятора (рисунок 51) была реализована на базе описанных выше компонентов. Разработанная система управления была внедрена в процесс водоподготовки ООО «Томская комплексная геологоразведочная экспедиция», о чем свидетельствует акт о внедрении (Приложение А). В результате эксплуатации электроэрозионной водоочистой установки с разработанной и внедренной системой управления было отмечено снижение затрат электроэнергии на процесс водоподготовки, при сохранившемся качестве очищенной воды.

#### **4.2 Принцип управления химико-технологическими процессами на базе прогнозирующих моделей**

В ходе диссертационного исследования, для управления химико-технологическими процессами, протекающими в атомной, нефтеперерабатывающей, химической, пищевой, металлургической и других промышленности, был развит принцип управления, основанный на использовании адаптивной прогнозирующей модели этих процессов. Общая функциональная схема системы управления представлена на рисунке 58.



ЗУ – задающее устройство, БР – блок рассогласования, БО – блок оптимизации,  
 МП – модель процесса, БУ – блок управления, ХР – химический реактор,  
 КИП – контрольно-измерительные приборы

Рисунок 58 – Функциональная схема системы управления химико-технологическими процессами на базе адаптивной прогнозирующей модели

В качестве объекта управления выступает химический реактор. Химический реактор – это аппарат, предназначенный для осуществления химических процессов, сочетающих химические реакции с массо- и теплопереносом. Типичными химическими реакторами являются промышленные печи, контактные аппараты, реакторы с механическим или струйным перемешиванием, варочные котлы и др. От правильности выбора реактора и его совершенства зависит эффективность всего технологического процесса.

Сущность развитого принципа управления заключается в том, что с помощью контрольно-измерительных приборов происходит контроль параметров процесса ( $k_i(t)$ ), протекающего в химическом реакторе, а также управляемой переменной ( $x(t)$ ). На основании данных об изменении параметров объекта управления ( $k_i(t)$ ) корректируются параметры модели процесса. В случае, если в ходе протекания процесса, а также в результате возмущающих воздействий ( $f(t)$ ), параметры процесса ( $k_i(t)$ ) не изменяются и нет необходимости в корректировке параметров модели процесса, то контроль  $k_i(t)$  не осуществляется. В работах [21, 22] представлен алгоритм пассивной

идентификации параметров модели процесса в замкнутом контуре, то есть в составе работающей системы управления. Текущее значение управляемой переменной  $x(t)$ , формирует начальные условия для модели процесса, с помощью которой осуществляется расчет реакции объекта управления  $\hat{x}(t)$  на управляющее воздействие, рассчитанное с помощью блока оптимизации  $r(t)$ . В блоке оптимизации происходит оптимизация функционала, базирующегося на сигнале рассогласования  $\varepsilon(t)$ , который генерируется блоком рассогласования. В блоке рассогласования находится разница между желаемым значением контролируемой переменной  $g(t)$  и значением контролируемой переменной, полученным в результате расчетов с помощью прогнозирующей модели  $\hat{x}(t)$ :

$$\varepsilon(t) = g(t) - \hat{x}(t). \quad (44)$$

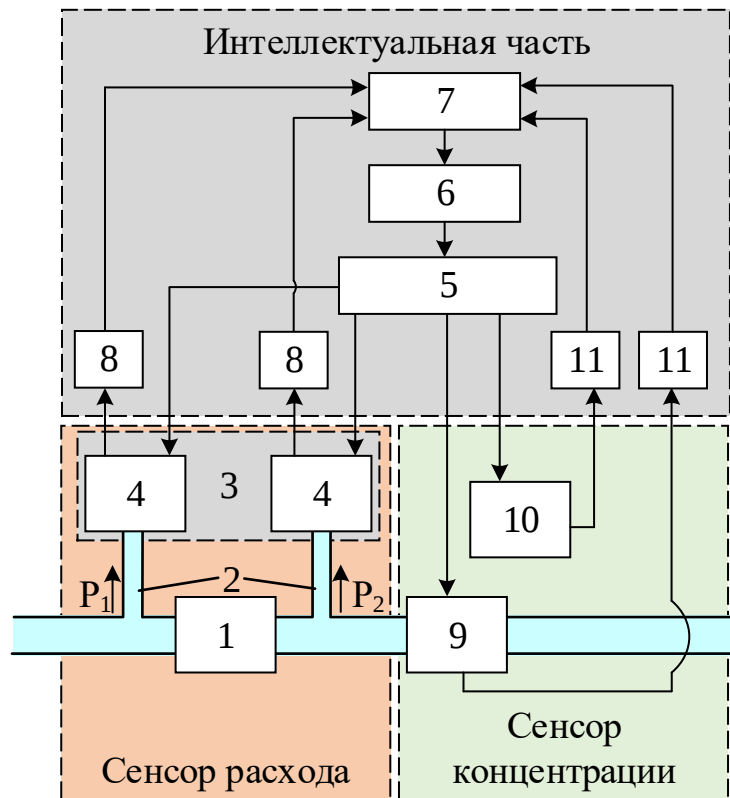
С помощью задающего устройства задается желаемое значение ( $g(t)$ ) для управляемой переменной (уставка). На основании рассчитанного оптимального воздействия ( $r(t)$ ), блок управления формирует управляющее воздействие ( $u(t)$ ) на объект управления.

Отличительной особенностью развитого принципа управления, в сравнении с уже известными, является наличие адаптивной прогнозирующей модели процесса. Описанный принцип управления защищен патентом на изобретение № 2657711 (Приложение Б).

Как правило, для большинства химико-технологических процессов осуществляется контроль нескольких технологических переменных. Для решения этой задачи, в ходе диссертационного исследования, был разработан интеллектуальный многопараметрический измерительный преобразователь на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных кабелей.

### 4.3 Интеллектуальный многопараметрический измерительный преобразователь на базе оптических измерительных систем

Структурная схема системы, для измерения нескольких технологических переменных одновременно и использование этих измерений для оценки других технологических параметров, представлена на рисунке 59.



- 1 – сужающее устройство; 2 – капиллярные линии; 3 – чувствительный элемент; 4 – решетки Брэгга, 5 – разветвитель светового потока; 6 – широкополосный оптический излучатель; 7 – блок электроники; 8 и 11 – фотоприемные устройства; 9 – измерительная кювета, 10 – эталонная кювета

Рисунок 59 – Структурная схема интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных кабелей

Принцип действия разработанного устройства (рисунок 59) заключается в следующем. На технологической линии, предназначенной для перекачки растворов, устанавливается сужающее устройство (1), например, сопло Вентури, капилляр для микрорасходов и т.д. Перед и после сужающего устройства (1) монтируются капиллярные линии (2), заполненные

разделительной жидкостью. Капиллярные линии (2) подключаются к чувствительному элементу (3), который может включать в свой состав либо решетки Брэгга, либо интерферометр Фабри-Перо, либо оптическое волокно с биконическим сужением (4). На чувствительный элемент (3), через разветвитель светового потока (5) поступает световой поток с определенной длиной волны, формируемый широкополосным оптическим излучателем (6), который управляется блоком электроники (7). За счет давлений  $P_1$  и  $P_2$  происходит изменение оптических сигналов на чувствительном элементе (3) и передача на фотоприемные устройства (8). С фотоприемных устройств (8) сигналы поступают в блок электроники (7), где происходит расчет перепада давления на сужающем устройстве.

Также на технологической линии монтируется измерительная кювета (9), предназначенная для определения концентраций компонентов в перекачиваемом растворе. При этом, используется эталонная кювета (10) заполненная эталонным раствором с заранее известной концентрацией контролируемого компонента. Оптические сигналы, полученные в результате прохождения светового потока через исследуемый и эталонный растворы, поступают на фотоприемные устройства (11), а затем в блок электроники (7) для дальнейшего анализа.

По результатам произведенных измерений блок электроники (7) производит расчет таких технологических параметров как расход раствора, через перепад давлений, концентрацию компонентов в растворе по закону Бугера-Ламберта-Бера и как результат массовый расход.

Укрупненная структурная схема экспериментального образца интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных кабелей приведена на рисунке 60.

Интеллектуальный вторичный преобразователь экспериментального образца изготавливается с применением отладочных плат микропроцессоров, интерфейсов и блоков управления. Применение отладочных плат позволяет

существенно сократить время макетирования электронных частей приборов в части изготовления. В качестве отладочных плат используются следующие решения:

- CY8CKIT-059 PSoC® 5LP Prototyping Kit – отладочная плата программируемой аналого-цифровой однокристальной микропроцессорной системы фирмы Cypress, содержащая микроконтроллерное ядро ARM Cortex-M3, программируемую интегральную схему (ПЛИС), программируемую интегральную аналоговую схему;

- модуль расширения Relay Shield, выпускаемый компанией «Амперка», г. Москва – плата, содержащая 4 канала дискретного управления с гальванической развязкой;

- модуль интерфейса RS-485 (Тройка rs485), выпускаемый компанией «Амперка», г. Москва;

- EVAL-AD5700EBZ – отладочная плата интерфейса HART фирмы Analog Device;

- EVAL-AD5421SDZ – отладочная плата формирователя токовой петли 4-20 мА и источника питания фирмы Analog Device.

Указанные отладочные платы соединяются между собой с помощью макетной платы соединений.

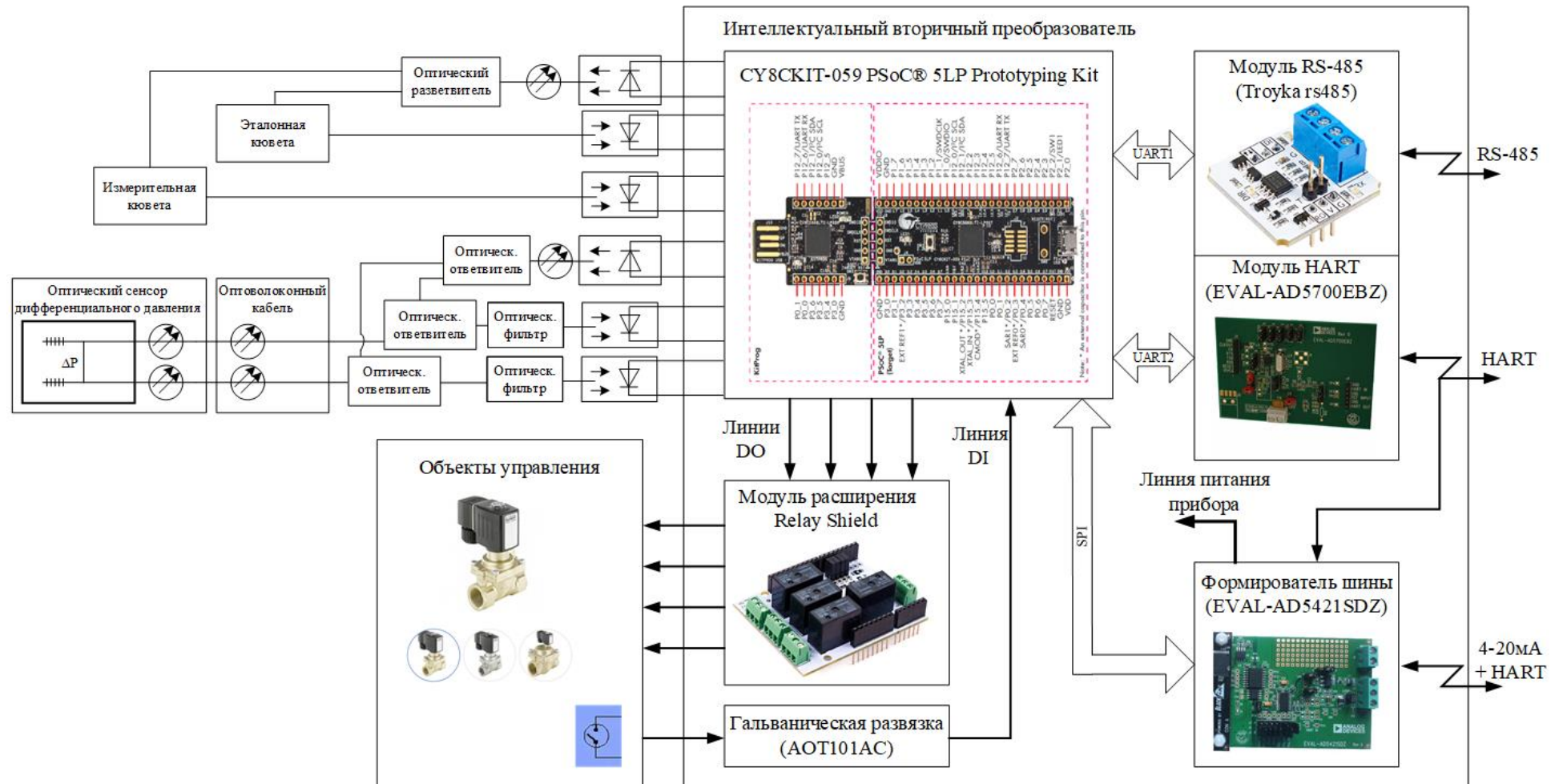
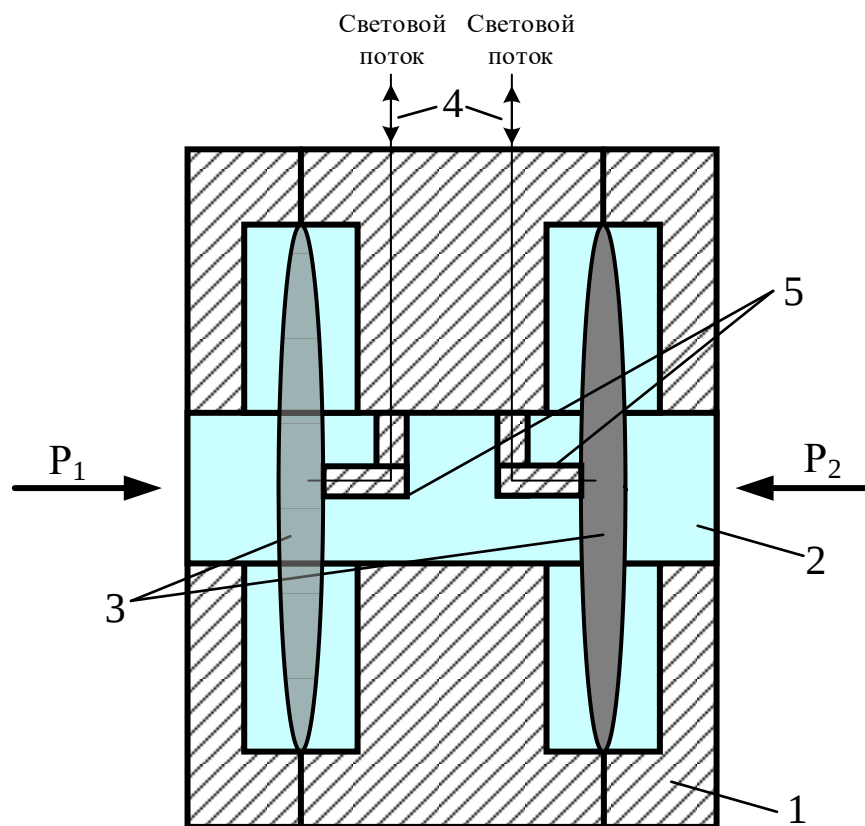


Рисунок 60 – Укрупненная структурная схема экспериментального образца интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных кабелей

В экспериментальном образце, укрупненная структурная схема которого представлена на рисунке 60, в качестве оптического сенсора разности давлений использовалась оптоволоконная брэгговская решетка. В случае применения отражательного оптического сенсора в схеме (рисунок 60) убираются оптические фильтры.

Структура чувствительного элемента, амплитудного оптического датчика дифференциального давления отражательного типа, представлена на рисунке 61.



1 – корпус; 2 – разделительная жидкость; 3 – измерительные мембраны; 4 – многомодовое оптическое волокно; 5 – фиксаторы оптического волокна в рабочем пространстве

Рисунок 61 – Структура чувствительного элемента, амплитудного оптического датчика дифференциального давления отражательного типа

На рисунке 61 видно, что измеряемые давления  $P_1$  и  $P_2$  подводятся к чувствительному элементу с противоположных сторон. Наличие разделительной жидкости (2) в рабочем пространстве чувствительного

элемента обеспечивает синхронное воздействие на обе измерительные мембраны (3), находящиеся в чувствительном элементе. Под воздействием давлений  $P_1$  и  $P_2$  на мембраны, происходит их деформация. Световой поток с определенной длиной волны (оптический сигнал) с помощью многомодового оптического волокна (4) поступает на поверхность мембран, отражается и возвращается на фотоприемное устройство. Для обеспечения неподвижности оптического волокна в рабочем пространстве чувствительного элемента, под действием измеряемого давления, предусмотрены фиксаторы (5). Расстояние между концами оптического волокна (4) и измерительными мембранами составляет порядка 200 мкм. Измерительные мембраны обладают хорошими отражательными свойствами и выполнены из латуни ЛС-68, толщиной 0,1 мм.

За счет изгиба (деформации) мембран возникает модуляция оптического сигнала по амплитуде, вызванная изменением расстояния между мембраной и оптическим волокном, а также за счет изменения радиуса кривизны самой мембраны. Наличие двух взаимосвязанных измерительных мембран позволяет учесть погрешности измерений, вносимые за счет температурного влияния на чувствительный элемент.

Целевой группой по использованию разработанного интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем являются стратегические отрасли Российской Федерации, такие как атомная и нефтегазовая промышленности. Это обусловлено тем, что в современных радиохимических производствах, в том числе во вновь создаваемых, в рамках проекта «Прорыв», Государственной корпорации «Росатом», используются приборы для контроля давления, практически во всех технологических линиях, концентрации и расхода жидких сред. Отличительной чертой является размещение большей части оборудования в «горячих» камерах в отличие от традиционных технологий, где оборудование размещалось преимущественно в каньонах. В связи с этим, предпочтительны приборы, элементы которых, размещенные на технологическом оборудовании, не требуют обслуживания и отличаются

высокой надежностью. Кроме того, с ростом добычи нефти и газа возникает потребность в освоении новых месторождений, находящихся в сложных природно-климатических условиях крайнего Севера. В таких условиях необходимость в контроле технологических параметров, таких как забойное и пластовое давления, расход бурового раствора, а также температура, становится более актуальной. Наличие сложных условий и измерение технологических параметров в нестандартно протекающем технологическом процессе, требуют применения нестандартных решений. Одним из важных требований, предъявляемых к контрольно-измерительным приборам, является удаление активной электроники из нефтяной скважины, что позволит увеличить срок службы оборудования и повысить надежность. Всем этим требованиям отвечает разработанный интеллектуальный многопараметрический измерительный преобразователь на базе оптических измерительных систем. Использование оптической измерительной системы позволяет реализовать принцип удаленного измерения, обеспечивает надежность прибора, существенно снижает эксплуатационные расходы. Преимущество данной измерительной системы заключается в том, что сенсор является необслуживаемым, не требует подведения питания, разделительных сред и т.д., может работать в жестких условиях, а интеллектуальная часть прибора находится в комфортных условиях с удалением вплоть до десятков километров от точки установки сенсора.

Разработка интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем была выполнена в рамках государственного задания № 8.3079.2017/ПЧ Министерства образования и науки Российской Федерации и договора с промышленным партнером ОАО «Манотомь» по теме «Разработка интеллектуального датчика дифференциального давления с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации» [24].

Результаты диссертационного исследования в части разработки интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных кабелей будут использованы для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации на базе ОАО «Манотомь», о чем свидетельствует соответствующий акт (Приложение В).

#### **4.4 Выводы по главе**

Автоматизированная система управления электроэрозионной водоочистной установкой, разработанная в результате диссертационного исследования (Глава 3), была реализована и прошла успешное испытание в процессе водоподготовки ООО «Томской комплексной геологоразведочной экспедиции» (Приложение А). В результате эксплуатации электроэрозионной водоочистной установки с разработанной и внедренной системой управления было отмечено снижение затрат электроэнергии на процесс водоподготовки, при сохранившемся качестве очищенной воды.

Обобщением результатов диссертационного исследования является развитие принципа управления на базе адаптивной прогнозирующей модели, для химико-технологических процессов, протекающих в химическом реакторе (промышленные печи, контактные аппараты, реакторы с механическим или струйным перемешиванием, варочные котлы и др.). Развитый принцип управления защищен патентом на изобретение № 2657711 (Приложение Б). Основной особенностью развитого принципа управления является наличие адаптивной математической модели процесса, которая достаточно точно описывает его поведение.

Для измерения нескольких технологических параметров был разработан интеллектуальный многопараметрический измерительный преобразователь на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных

кабелей. Разработанный прибор позволяет измерять расход раствора и концентрацию компонентов в растворе. Использование оптической измерительной системы позволяет реализовать принцип удаленного измерения, обеспечивает надежность прибора, существенно снижает эксплуатационные расходы. Разработка интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем была выполнена в рамках государственного задания № 8.3079.2017/ПЧ Министерства образования и науки Российской Федерации и договора с индустриальным партнером ОАО «Манотомь» по теме «Разработка интеллектуального датчика дифференциального давления с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации» (Приложение В).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности и безопасности протекания различных технологических процессов обуславливает необходимость в разработке и применении систем управления. Особенно актуальной задачей это является для технологических процессов химический, атомной, нефте- и газоперерабатывающей промышленности, где предъявляются повышенные требования к эффективности и безопасности протекания процессов. Частным случаем химико-технологических процессов являются процессы, протекающие в водоочистных установках. Очистка природных и промышленных сточных вод от растворенных в них вредных примесей является актуальной задачей. Применение таких классических методов, как обратный осмос, ионообменное осаждение, отстаивание и других методов, имеет ряд трудностей и не всегда является эффективным. Для решения этой проблемы разработано не мало новых методов и технологий водоочистки, основанных на комбинировании классических методов водоочистки и методов, использующих электрическую энергию. Одним из таких методов, основанном на использовании электрической энергии, является очистка воды с помощью электроэрозионной обработки слоя металлических шариков в очищаемой воде. Главная цель применения электроэрозионного процесса для очистки воды заключается в том, чтобы перевести растворенные в воде вредные примеси в нерастворимый осадок, который затем удаляется из воды с помощью классических методов.

В ряде научных работ было показано, что для эффективного протекания электроэрозионного процесса очистки воды необходимо наличие достаточного количества высокодисперсных продуктов электрической эрозии. При этом, габариты установки, масса загрузки, а также необходимое количество образующихся высокодисперсных продуктов электрической эрозии определяются инженерами-технологами при проектировании водоочистной установки, исходя из необходимой производительности

аппарата и типа загрязнителя. Электропроводность обрабатываемого водного раствора зависит от концентрации растворенных в нем вредных примесей и влияет на количество и размеры образующихся продуктов электрической эрозии. Для эффективного протекания электроэрозионного процесса очистки воды необходимо обеспечить стабильное выделение высокодисперсных продуктов электрической эрозии. В результате проведенного обзора и анализа литературных источников не выявлено наработок в области разработки систем управления электроэрозионными водоочистными установками. В связи с этим, создание автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой является актуальной задачей.

Представленные в литературе исследования по математическому моделированию электроэрозионного процесса, не могут быть использованы для описания процессов, протекающих в электроэрозионной водоочистной установке, поскольку рассматривают процессы либо для электроэрозионных станков, либо для конкретной водоочистной установки с определенным наполнением. В связи с этим, для синтеза автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой была разработана математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления. Разработанная математическая модель базируется на методе вероятностных клеточных автоматов и отражает динамику изменения концентрации продуктов электрической эрозии в зависимости от изменения напряжения подаваемых электрических импульсов и концентрации вредных примесей, содержащихся в обрабатываемом водном растворе. Для оценки адекватности, разработанной математической модели, было рассчитано приведенное среднеквадратическое отклонение расчетных данных от экспериментальных. Расхождение между данными составило порядка 6 %, что позволяет считать разработанную модель адекватной и использовать для дальнейшей работы.

Теоретический анализ и практические исследования показали преимущества применения систем управления на базе прогнозирующих

моделей (MPC – Model Predictive Control) перед системами управления на базе ПИД-регуляторов и ПИД-регуляторов с нечеткой логикой, для управления многомерными (много связными) объектами, объектами, поведение которых описывается передаточной функцией высокого порядка (второго и выше), а также сложными динамическими объектами, параметры которых изменяются в ходе технологического процесса. В виду сложности электроэрозионного процесса водоочистки, а также учитывая результаты сравнения MPC регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой, для управления электроэрозионной водоочистной установкой был выбран MPC регулятор. В ходе диссертационного исследования была разработана функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой на базе MPC регулятора. Для синтеза MPC регулятора было произведено упрощение разработанной ранее математической модели электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления. С помощью созданной компьютерной модели была получена статическая характеристика электроэрозионной водоочистной установки по каналу управления. Полученная статическая характеристика является нелинейной. Учитывая технические особенности используемого генератора электрических импульсов и нелинейность полученной статической характеристики, была выделена рабочая точка и рабочий интервал, подаваемых электрических импульсов. В результате электроэрозионный процесс очистки воды по каналу управления был описан инерционным звеном второго порядка с разными постоянными времени. Для контроля управляемой переменной был разработан оптический датчик концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе, основанный на спектрофотометрическом методе. Используя компьютерную модель процесса было проведено исследование разработанной системы управления. В результате моделирования были определены оптимальные значения горизонтов прогнозирования и управления для MPC регулятора, используемого в разработанной системе управления. Также показано, что

разработанная система управления электроэрозионной водоочистой установкой на базе МРС регулятора позволяет стабилизировать концентрацию продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе на заданном уровне.

Разработанная автоматизированная система управления электроэрозионной водоочистой установкой на базе МРС регулятора была внедрена в процесс водоподготовки ООО «Томская комплексная геологоразведочная экспедиция», о чем свидетельствует соответствующий акт о внедрении результатов диссертационного исследования.

Обобщением результатов диссертационного исследования является:

- развитие принципа управления на базе адаптивной прогнозирующей модели, для химико-технологических процессов, протекающих в химическом реакторе;
- разработка интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных кабелей.

Интеллектуальный многопараметрический измерительный преобразователь на базе оптических измерительных систем ориентирован на предприятия атомной и нефтегазовой промышленности. Это обусловлено тем, что в современных радиохимических производствах, в том числе во вновь создаваемых, в рамках проекта «Прорыв», Государственной корпорации «Росатом», используются приборы для контроля давления, практически во всех технологических линиях, концентрации и расхода жидких сред. Отличительной чертой является размещение большей части оборудования в «горячих» камерах. В связи с этим, предпочтительны приборы, элементы которых, размещенные на технологическом оборудовании, не требуют обслуживания и отличаются высокой надежностью. Кроме того, с ростом добычи нефти и газа возникает потребность в освоении новых месторождений, находящихся в сложных природно-климатических условиях крайнего Севера. В таких условиях необходимость в контроле технологических параметров,

таких как забойное и пластовое давления, расход бурового раствора, а также температура, становится более актуальной. Одним из важных требований, предъявляемых к контрольно-измерительным приборам, является удаление активной электроники из нефтяной скважины, что позволит увеличить срок службы оборудования и повысить надежность. Всем этим требованиям отвечает разработанный интеллектуальный многопараметрический измерительный преобразователь на базе оптических измерительных систем. Использование оптической измерительной системы позволяет реализовать принцип удаленного измерения, обеспечивает надежность прибора, существенно снижает эксплуатационные расходы. Преимущество данной измерительной системы заключается в том, что сенсор является необслуживаемым, не требует подведения питания, разделительных сред и т.д., может работать в жестких условиях, а интеллектуальная часть прибора находится в комфортных условиях с удалением вплоть до десятков километров от точки установки сенсора.

Оригинальность разработок подтверждена патентом на изобретение, а их внедрение соответствующими актами.

Выполненная научная квалификационная работа, содержит решение задачи, заключающейся в повышении эффективности химико-технологического процесса за счет использования автоматизированной системы управления с прогнозирующей моделью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бабенков, В.А. Повышение эффективности управления технологическими процессами с использованием наблюдателей и регуляторов состояния (на примере производства экстракционной фосфорной кислоты) [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.13.06: защищена 02.03.16 / Бабенков Владимир Александрович. – Старый Оскол, 2015. – 189 с.
- 2 Akter, A. Immobilization of heavy metals in tannery sludge by subcritical water treatment [Text] / A. Akter, M. Goto, M.J.M. Mohd Noor, A.K.M. Muzahidul Islam, U. Motoo, Z.Z. Ya, A. Parvez // Chemical Engineering Transactions. – 2017. – № 56. – P. 265-270.
- 3 Delcolle, R. A comparison between coagulation and ultrafiltration processes for biodiesel wastewater treatment [Text] / R. Delcolle, M.L. Gimenes, C. Fortulan, W. Moreira, N. Martins, N. Pereira // Chemical Engineering Transactions. – 2017. – № 57. – P. 271-276.
- 4 Lutcmiah, K. Forward osmosis for application in wastewater treatment: A review [Text] / K. Lutcmiah, A.R.D. Verliefde, K. Roest, L.C. Rietveld // Water research. – 2014. – № 58. – P. 179-197.
- 5 Rehman, A. Operational parameter influence on heavy metal removal from metal plating wastewater by electrocoagulation process [Text] / A. Rehman, M. Kim, A. Reverberi, B. Fabiano // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – № 43. – P. 2251-2256.
- 6 Sechi, E. Nickel-based nanoporous electrodes for water treatment [Text] / E. Sechi, A. Vacca, M. Mascia, S. Palmas // Chemical Engineering Transactions. – 2016. – № 47. – P. 97-102.
- 7 Demirci, Y. Textile wastewater conductivity control of electrocoagulation process using MatLab / Simulink [Text] / Y. Demirci // Global NEST Journal. – 2014. – № 16. – P. 348-353.

8 Demirci, Y. Application of fuzzy control on the electrocoagulation process to treat textile wastewater [Text] / Y. Demirci, L.C. Pekar, A. Altınten, M. Albaz // Environmental Technology. – 2015. – № 36. – P. 3243-3252.

9 Nadezhdin, I.S. Mathematical modeling of EDM method of water purification [Text] / I.S. Nadezhdin, A.G. Goryunov, F. Manenti, A.O. Ochoa Bique // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. – 2016. – Vol. 1. – P. 254-258.

10 Надеждин, И.С. Математическое моделирование электроэрозионных лунок на поверхности металлических шариков [Текст] / И.С. Надеждин, А.Г. Горюнов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 4. – С. 89-91.

11 Nadezhdin, I.S. Modeling of the distribution of electric discharge between metal balls in the aqueous solution [Text] / I.S. Nadezhdin, A.G. Goryunov, F. Manenti // Chemical Engineering Transactions. – 2017. – Vol. 61. – P. 535-540.

12 Надеждин, И.С. Математическая модель электроэрозионного процесса очистки воды [Текст] / И.С. Надеждин // Материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2017». – 2017. – № 4. – С. 161-163.

13 Надеждин, И.С. Моделирование распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе [Текст] / И.С. Надеждин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 4. – С. 153-155.

14 Nadezhdin, I.S. Control Systems of a Non-stationary Plant Based on MPC and PID Type Fuzzy Logic Controller [Text] / I.S. Nadezhdin, A.G. Goryunov, F. Manenti, A.O. Ochoa Bike // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. – 2016. – Vol. 1. – P. 219-224.

15 Nadezhdin, I.S. Fuzzy Adaptive Control System of a Non-Stationary Plant [Text] / I.S. Nadezhdin, A.G. Goryunov, F. Manenti // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – Number of article 012048.

16 Nadezhdin, I.S. Optimisation of EDM process for water purification [Text] / I.S. Nadezhdin, D. Papasidero, A.G. Goryunov, F. Manenti // Chemical Engineering Transactions. – 2016. – Vol. 52. – P. 325-330.

17 Nadezhdin, I.S. Development of a MPC-based control system for electrical discharge of water purification plant [Text] / I.S. Nadezhdin, A.G. Goryunov, F. Manenti // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 70. – P. 1393-1398.

18 Надеждин, И.С. Система управления электроэрозионной водоочистой установкой [Текст] / И.С. Надеждин, А.В. Платонова // Материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2018». – 2018. – Т. 3. – С 77-80.

19 Надеждин, И.С. Система управления электроэрозионной водоочистой установкой на базе MPC регулятора [Текст] / И.С. Надеждин, А.Г. Горюнов // Приборы. – 2018. – № 5. – С 21-26.

20 Патент на изобретение № 2657711; заявка № 2017120953 от 14.06.2017, дата рег. 14.06.2018; Бюл. № 17 от 14.06.2018 // Надеждин И.С., Горюнов А.Г., Дьяченко А.Н., Бахтадзе Н.Н., Быков А.А., Громов О.Б., Максимов Е.М., Михеев П.И., Травин С.О. Комплекс для моделирования химико-технологических процессов.

21 Dyadik, V.F. Passive Identification is Non Stationary Objects With Closed Loop Control [Text] / V.F. Dyadik, I.S. Nadezhdin, A.G. Goryunov, F. Manenti // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – Number of article 012047.

22 Krinitsyn, N.S. Plant Identification in the Closed-loop Control System [Text] / N.S. Krinitsyn, A.D. Uvarova, V.F. Dyadik, A.G. Goryunov, I.S. Nadezhdin // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. – 2016. – Vol. 1. – P. 229-233.

23 Надеждин, И.С. Спектрофотометрический датчик концентрации [Текст] / И.С. Надеждин, М.А. Архипов // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – Т. 2. – С. 41-43.

24 Разработка интеллектуального датчика дифференциального давления с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : Томский политехнический университет; рук. Горюнов А. Г. – Томск, 2017 – 337 с. – Исполн.: Надеждин И. С. [и др.] (всего 22 чел.).

25 Лазаренко, Б.Р. Изыскание новых применений электричества [Текст] / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 5. – С. 5-19.

26 Верхотуров, А.Д. Некоторые комментарии к обобщениям механизма электроискрового воздействия на материалы [Текст] / А.Д. Верхотуров, П.С. Гордиенко, Л.А. Коневцов, Е.С. Панин // Вестник ДВО РАН. – 2010. – № 1. – С. 46-54.

27 Pat. 3726727 United States. Chemical welding material / W. Ishibashi. issued 28 November 1967.

28 Ishibashi, W. Method of producing pure alumina by spark discharge process and the characteristics there of [Text] / W. Ishibashi, T. Araki, K. Kisimoto, H. Kuno // Ceramics Japan. – 1971. – № 6. – P. 461–468.

29 Berkowitz, A. E. Spark erosion: A method for producing rapidly quenched fine powders [Text] / A.E. Berkowitz, J.L. Walter // J. Mater. Res. – 1987. – Vol. 2. – № 2. – P. 277-288.

30 Щерба, А.А. Основные принципы построения многофазных стабилизированных источников питания установок электроэрозионного диспергирования металлов в жидкости [Текст] / А.А. Щерба // Проблемы преобразовательной техники. – 1983. – Т. 1. – С. 59-62.

31 Фоминский, Л.П. Некоторые аспекты электроэрозионного способа получения окиси алюминия [Текст] / Л.П. Фоминский // Электронная обработка материалов. – 1980. – № 1. – С. 46-49.

32 Зубенко, А.А. Исследование свойств электроразрядного гидроксида алюминия [Текст] / А.А. Зубенко, А.Н. Ющишина // Электронная обработка материалов. – 2001. – № 6. – С. 60-65.

33 Байрамов, Р.К. Образование металлического порошка при электроискровом диспергировании алюминия [Текст] / Р.К. Байрамов, Н.Р. Ведерникова, А.И. Ермаков // Журнал прикладной химии. – 2001. – Т. 74. – № 10. – С. 1706-1708.

34 Хайнацкий, С.А. Экспериментальное исследование некоторых закономерностей эрозии алюминиевых и железных гранул при высоковольтных электрических разрядах в реакторе с металлической загрузкой [Текст] / С.А. Хайнацкий, А.А. Смалько, А.А. Зубенко // Электронная обработка материалов. – 2005. – № 4. – С. 62-65.

35 Shcherba, A.A. Spark-eroded particles: size analysis, cooling rate, microstructure [Text] / A.A. Shcherba, A.D. Podoltsev, I.N. Kucheryavaya, A.E. Perekos // Техническая электродинамика. – 2005. – № 5. – С. 3-8.

36 Ушаков, В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей [Текст] / В.Я. Ушаков. – Томск.: Изд-во Томского университета, 1975. – 256 с.

37 Наугольных, К.А. Электрические разряды в воде [Текст] / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с.

38 Левченко, В.Ф. Электроимпульсная очистка сточных вод машиностроительных предприятий [Текст] / В.Ф. Левченко, А.Н. Глупак // Проблемы машиностроения. – 1998. – Т. 1. – № 3-4. – С. 138-140.

39 Хайнацкий, С.А. Исследования комплексной очистки воды от ионов тяжелых металлов при высоковольтных разрядах в реакторах с гранулированной металлозагрузкой. Часть 1. Модельные растворы [Текст] / С.А. Хайнацкий, А.А. Зубенко, Л.А. Петриченко // Электронная обработка материалов. – 2005. – № 6. – С. 47-52.

40 Хайнацкий, С.А. Исследования комплексной очистки воды от ионов тяжелых металлов при высоковольтных разрядах в реакторах с гранулированной металлозагрузкой. Часть 2. Реальные гальваностои [Текст] / С.А. Хайнацкий, А.А. Зубенко, А.А. Смально // Электронная обработка материалов. – 2005. – № 6. – С. 53-58.

41 Патент РФ 2049733 МПК С 02 F 1/46, Способ очистки воды от ионов металлов / В.М. Тюрин, Л.П. Фоминский. – Опубл.10.12.1995.

42 Патент РФ 2220110 МПК С 02 F 1/48 Электроимпульсный способ очистки воды / Ю.В. Левченко, В.Ф. Левченко. – Опубл. 27.12.2003.

43 Шидловский, А.К. Формирование выходных характеристик преобразователей с учетом свойств объемной электроэрозионной нагрузки [Текст] / А.К. Шидловский, А.А. Щерба, В.А. Муратов // Техническая электродинамика. – 1988. – № 1. – С. 28-34.

44 Щерба, А.А. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул [Текст] / А.А. Щерба, И.В. Штомпель // Сборник науч. трудов. – Киев, Изд-во института электродинамики НАНУ. – 1991. – С. 65-73.

45 Щерба, А.А. Стабилизация и регулирование параметров разрядных импульсов в системах объёмной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред [Текст] / А.А. Щерба, С.Н. Захарченко // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електродинаміка' 2001. – К.: ІЕД НАНУ. – 2001. – С. 30–35.

46 Щерба, А.А. Исследование электроэрозионных явлений при протекании импульсного тока между токопроводящими гранулами с учетом микроплазменного контактного промежутка [Текст] / А.А. Щерба, А.Д. Подольцев, И.Н. Кучерявая // Техническая электродинамика. – 2002. – № 4. – С. 3-7.

47 Шидловский, А.К. Перспективы применения искроэрозионной коагуляции в системах водоподготовки тепловых сетей [Текст] /

А.К. Шидловский, А.А. Щерба, С.Н. Захарченко // Вода і водоочисні технології. – 2003. – № 2. – С. 26-31.

48 Патент СССР 1499952, Способ получения дисперсно-упрочненного материала на основе платины / Д.С. Тыкочинский, А.А. Щерба, В.А. Ястребов, Е.И. Рывтин, С.Д. Левченко. – Заявка 13.01.1987. – Опубликовано 27.11.1995.

49 Патент СССР 1798873, Адаптивный формирователь импульсного тока для электроэрозионной обработки / А.К. Шидловский, А.А. Щерба, А.Н. Павелко, В.А. Муратов. – Заявка 14.08.1989. – Опубликовано 28.02.1993.

50 Яворовский, Н.А. Очистка воды с применением электроразрядной обработки [Текст] / Н.А. Яворовский, В.Д. Соколов, Ю.Л. Сколубович, И.С. Ли // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 1. – С. 12-14.

51 Яворовский, Н.А. Импульсный барьерный разряд как метод обработки воды: активные частицы-окислители в водо-воздушном потоке [Текст] / Н.А. Яворовский, Я.И. Корнев // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 108-113.

52 Kornev, J. Generation of active oxidant species by pulsed dielectric barrier discharge in water-air mixtures [Text] / J. Kornev, N. Yavorovsky, S. Preis, M. Khaskelberg, U. Isaev, B-N. Chen // Ozone: Science Engineering. – 2006. – Vol. 28. – № 4. – P. 207-215.

53 Даниленко, Н.Б. Очистка воды от As(V) электроимпульсной обработкой активной металлической загрузки [Текст] / Н.Б. Даниленко, Г.Г. Савельев, Н.А. Яворовский // Журнал прикладной химии. – 2005. – Т. 78. – № 10. – С. 1659-1663.

54 Даниленко, Н.Б. Химические реакции при действии импульсных электрических разрядов на активную металлическую загрузку в растворе солей хрома (VI) [Текст] / Н.Б. Даниленко, Г.Г. Савельев, Т.А. Юрмазова, Н.А. Яворовский // Журнал прикладной химии. – 2007. – Т. 80. – № 1. – С. 88-93.

55 Даниленко, Н.Б. Изучение состава и кинетики образования продуктов эрозии металлической загрузки электроразрядного реактора [Текст] /

Н.Б. Даниленко, Г.Г. Савельев, Н.А. Яворовский, Т.А. Юрмазова, А.И. Галанов, П.В. Балухтин // Журнал прикладной химии. – 2005. – № 9. – Т. 78. – С. 1463-1468.

56 Лобанова, Г.Л. Исследование механизма реакций, протекающих при электроимпульсном воздействии на водные растворы органических веществ [Текст] / Г.Л. Лобанова, Л.Н. Шиян, Т.А. Юрмазова, Д.А. Войно // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: [www.science-education.ru/ru/article/view?id=11525](http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11525).

57 Войно, Д.А. Комплексный подход получения питьевой воды из подземных источников Западной Сибири [Текст] / Д.А. Войно, Л.Н. Шиян, К.И. Мачехина // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58. – № 3. – С. 82-86.

58 Tao, J. Modeling of the Anode Crater Formation in Electrical Discharge Machining [Text] / J. Tao, J. Ni, A.J. Shih // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2012. – Vol. 134. – P. 207-218.

59 Mohanty, C.P. Thermal-structural Analysis of Electrical Discharge Machining Process [Text] / C.P. Mohanty, J. Sahu, S.S. Mahapatra // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 51. – P. 508-513.

60 Ming, W. A hybrid process model for EDM based on finite-element method and Gaussian process regression [Text] / W. Ming, G. Zhang, H. Li, J. Guo, Z. Zhang, Yu Huang, Z. Chen // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 74. – P. 1197-1211.

61 Shao, B. Modelling of the crater formation in micro-EDM [Text] / B. Shao, K.P. Rajurkar // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 33. – P. 376-381.

62 Карпов, Д.И. Фрактальная модель развития разряда в диэлектриках [Текст] / Д.И. Карпов, О.И. Плешков, М.Д. Носков // Химическая технология и автоматизация предприятий ядерного топливного цикла: Сб. научных статей. – Северск. – 1999. – С. 114-118.

63 Kupershtokh, A.L. Stochastic model of streamer growth in dielectric liquids with hydrodynamic expansion of streamer channels [Text] /

A.L. Kupershtokh, D.I. Karpov // 14<sup>th</sup> International Conference on Di-electric Liquids (ICDL), Graz, Austria, July 7–12, 2002: Proceedings. – S.l.: IEEE. – 2002. – P.111-114.

64 Ghiculescu, D. Some aspects of finite element modelling of micro-EDM and ultrasonic EDM with time dependent radius of plasma channel [Text] / D. Ghiculescu, N. Marinescu, S. Nanu, // Nonconventional Technologies Review. – 2013. – P. 30-35.

65 Upadhyayula, V.K.K. Application of carbon nanotube technology for removal of contaminants in drinking water: A review [Text] / V.K.K. Upadhyayula, S. Deng, M.C. Mitchell, G.B. Smith // Science of the Total Environment. – 2009. – № 408. – P. 1-13.

66 Abdulgader, Al H. Hybrid ion exchange – Pressure driven membrane processes in water treatment: A review [Text] / Al H. Abdulgader, V. Kochkodan, N. Hilal // Separation and Purification Technology. – 2013. – № 116. – P. 253-264.

67 Parrino, F. Combination of ozonation and photocatalysis for purification of aqueous effluents containing formic acid as probe pollutant and bromide ion [Text] / F. Parrino, G. Camera-Roda, V. Loddo, G. Palmisano, V. Augugliaro // Water research. – 2014. – № 50. – P. 189-199.

68 Den, W. Removal of silica from brackish water by electrocoagulation pretreatment to prevent fouling of reverse osmosis membranes [Text] / W. Den, C.-J. Wang // Separation and Purification Technology. – 2008. – № 59. – P. 318-325.

69 Won, C.-H. Evaluation of optimal reuse system for hydrofluoric acid wastewater [Text] / C.-H. Won, J. Choi, J. Chung // Journal of Hazardous Materials. – 2012. – № 239. – P. 110-117.

70 Sobana, S. Modeling and control of reverse osmosis desalination process using centralized and decentralized techniques [Text] / S. Sobana, R.C. Panda // Desalination. – 2014. – № 344. – P. 243-251.

71 Войно, Д.А. Процесс очистки природных вод от гуминовых веществ с использованием электроразрядного реактора [Текст]: дис. канд. техн. наук:

05.17.08: защищена 28.06.16 / Войно Денис Александрович. – Томск, 2016. – 126 с.

72 Мельников, Н.П. Развитие электрического пробоя в водных электролитах [Текст] / Н.П. Мельников, Г.А. Остроумов, М.Ю. Стояк // Пробой диэлектриков и полупроводников. – М.; Л.: Энергия, 1964. – С. 246-248.

73 Мельников, Н.П. Некоторые особенности электрического разряда в электролитах [Текст] / Н.П. Мельников, Г.А. Остроумов, А.А. Штейнберг // Пробой диэлектриков и полупроводников. – М.; Л.: Энергия, 1964. – С. 232-235.

74 Поклонов, С.Г. Определение напряжения пробоя водного межэлектродного промежутка [Текст] / С.Г. Поклонов // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 1. – С. 72-78.

75 Shabgard, M. Mathematical and numerical modeling of the effect of input parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process [Text] / M. Shabgard, R. Ahmadi, M. Seyedzavvar, S.N.B. Oliaei // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 65. – P. 79-87.

76 Альмяшев, В.И. Применение метода конечных автоматов для кинетического анализа химического взаимодействия материалов с расплавами [Текст] / В.И. Альмяшев, С.В. Бешта, В.С. Грановский, В.В. Гусаров // Сборник трудов научно-практического совещания «Электротермия-2000», СПб. – 2000. – С. 39-56.

77 Винер, Н. Проведение импульсов в сердечной мышце. Математическая формулировка проблемы проведения импульсов в сети связанных возбудимых элементов, в частности, в сердечной мышце [Текст] / Н. Винер, А. Розенблюм // Кибернетический сборник. М.: Издательство иностранной литературы. – 1961. – Т. 3. – С. 7-56.

78 Нейман, Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов [Текст] / Дж. Нейман. – М.: Мир, 1971. – 381 с.

79 Wolfram, S. Twenty problems in the theory of cellular automata [Text] / S. Wolfram // Physica Scripta. – 1985. – Vol. 9. – P. 170-183.

80 Wolfram, S. Theory and Application of Cellular Automata [Text] / S. Wolfram // World Scientific Publishing. – 1986. – P. 485-557.

81 Беркович, С.Я. Клеточные автоматы как модель реальности: поиски новых представлений физических и информационных процессов [Текст] / С.Я. Беркович. – Издательство МГУ, 1983. – 110 с.

82 Малинецкий, Г.Г. Клеточные автоматы в математическом моделировании и обработке информации [Текст] / Г.Г. Малинецкий, М.С. Шакаева // М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. – 1994. – № 57.

83 Кольцова, Э.М. Пелинейная динамика и термодинамика необратимых процессов в химии и химической технологии [Текст] / Э.М. Кольцова, Ю.Д. Третьяков, Л.С. Гордеев, А.А. Вертегел. – М.: Химия, 2001. – 408 с.

84 Карпов, Ю.Г. Теория автоматов [Текст] / Ю.Г. Карпов. – СПб.: Питер, 2002. – 224 с.

85 Тоффоли, Т. Машины клеточных автоматов [Текст] / Т. Тоффоли, М. Марголус. – М.: Мир, 1991. – 283 с.

86 Надеждин, И.С. Моделирование распространения электрических разрядов между металлическими гранулами в электроэрозионной водоочистной установке [Текст] / И.С. Надеждин, Д.А. Сериков // Сборник докладов 64-й международной молодежной научно-технической конференции Молодежь. Наука. Инновации. – 2016. – Т. 1. – С. 141-145.

87 Надеждин, И.С. Применение клеточных автоматов для моделирования распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе [Текст] / И.С. Надеждин, А.Г. Горюнов // Сборник трудов восьмой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». – 2017. – С. 485-490.

88 Журавков, С.П. Изучение свойств наноразмерных частиц серебра, полученных электроимпульсным методом [Текст] / С.П. Журавков, Е.В. Плотников, Д.В. Мартемьянов, Н.А. Яворовский, U. Hasse, S. Zander // Известия вузов. Физика: научный журнал. – 2013. – Т. 56. – № 7-2. – С. 141-145.

89 Галанов, А.И. Получение оксида и пероксида цинка электроискровым диспергированием цинковых гранул [Текст] / А.И. Галанов, Г.Л. Лобанова, С.П. Журавков, Ф.Е. Сапрыкин, Я.И. Корнев, Н.А. Яворовский // Перспективные материалы. – 2013. – № 4. – С. 64-71.

90 Plotnikov, E. Investigation of genotoxicity of gold nanoparticles prepared by the electric spark dispersion method [Text] / E. Plotnikov, S. Zhuravkov, A. Gapeyev, V. Plotnikov, D. Martemiyanov // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 65-69.

91 Zhuravkov, S. Production of aluminium oxyhydroxides by various methods [Text] / S. Zhuravkov, A. Pustovalov, G. Lobanova, O. Kvashnina, N. Yavorovsky // 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Autornation and Control Systems (MEACS). – INSPEC Accession Number: 14823102.

92 Kumar, A. Numerical Modeling of Wire Electrical Discharge Machining of Super alloy Inconel 718 [Text] / A. Kumar, D.K. Bagal, K.P. Maity // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 97. – P. 1512-1523.

93 Щерба, А.А. Стабилизация параметров электрической энергии [Текст] / А.А. Щерба, И.В. Штомпель // Сб. науч. тр. Киев: Изд-во Ин-та электродинамики НАНУ. – 1991. – С. 65-73.

94 Воробьев, И.И. Применение измерения электропроводности для характеристики химического состава природных вод [Текст] / И.И. Воробьев. – М., Изд-во АН СССР, 1963. – 141 с.

95 Математическое моделирование и оптимизация электроэрозионного метода очистки воды [Текст] : отчет о НИР (заключ.) : Томский политехнический университет; рук. Надеждин И. С. – Томск, 2018 – 42 с. – Исполн.: Надеждин И. С. [и др.] (всего 2 чел.).

96 Даниленко, Н.Б. Реакции в разбавленных растворах солей, протекающие при диспергировании металлов импульсными электрическими разрядами [Текст]: дис. канд. хим. наук: 02.00.04: защищена 14.06.07 / Даниленко Нина Борисовна. – Томск, 2007. – 172 с.

97 Даниленко, Н.Б. Применение импульсных электрических разрядов в водных растворах для получения наноматериалов и их использование для очистки воды [Текст] / Н.Б. Даниленко, А.И. Галанов, Я.И. Корнев, П.В. Балухтин, Л.Н. Шиян, Т.А. Юрмазова, Н.А. Яворовский, Г.Г. Савельев // Нанотехника. – 2006. – № 8. – С. 81-91.

98 Kovala, I. Параметрический синтез комбинированных автоматических систем регулирования с цифровыми ПИД-регуляторами [Текст] / I. Kovala, O. Ivaniuk, G. Vлах-Vyhrynovska, R. Stakhiv // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – Т. 6. – № 2. – С. 37-44.

99 Владов, Ю.Р. Формирование управляющего воздействия ПИД-контроллером для промышленных объектов с учетом прогнозной составляющей [Текст] / Ю.Р. Владов, А.Ю. Влагова // СТИН. – 2017. – № 11. – С. 20-24.

100 Sondhi, S. Fractional order PID controller for load frequency control [Text] / S. Sondhi, Y.V. Hote // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 85. – P. 343-353.

101 Vlad, G. PID control of the removal of organic component in wastewater treatment plants [Text] / G. Vlad, R. Crişan, G. Harja, I. Naşcu // Journal of Environmental Research and Protection. – 2014. – Vol. 11. – P. 23-31.

102 Tzoneva, R. Optimal PID control of the dissolved oxygen concentration in the wastewater treatment plant [Text] / R. Tzoneva // AFRICON 2007. – 2007. – Article Number: 9857388.

103 Mercorelli, P. An Optimal and Stabilising PI Controller with an Anti-windup Scheme for a Purification Process of Potable Water [Text] / P. Mercorelli // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48. – P. 259-264.

- 104 Александров, А.Г. Самонастраивающийся ПИД-регулятор (СН-ПИД-1) [Текст] / А.Г. Александров, М.В. Паленов // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения. Материалы конференции с международным участием. Институт проблем управления им. Трапезникова РАН. – 2010. – С. 31-37.
- 105 Александров, А.Г. Адаптивный ПИД-регулятор – ЧАР-ПИД-1 [Текст] / А.Г. Александров, М.В. Паленов, И.Г. Резков // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 9. – С. 58-61.
- 106 Kudinov, Y.I. Optimization of Fuzzy PID Controller's Parameters [Text] / Y.I. Kudinov, V.A. Kolesnikov, F.F. Pashchenko, A.F. Pashchenko, L. Papic // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 618-622.
- 107 Liu, L. Variable-order fuzzy fractional PID controller [Text] / L. Liu, F. Pan, D. Xue // ISA Transactions. – 2015. – Vol. 55. – P. 227-233.
- 108 Manenti, F. Fuzzy adaptive control system of a non-stationary plant with closed-loop passive identifier [Text] / F. Manenti, F. Rossi, A.G. Goryunov, V.F. Dyadik, K.A. Kozin, I.S. Nadezhdin, S.S. Mikhalevich // Resource-Efficient Technologies. – 2015. – Vol. 1. – P. 10-18.
- 109 Manenti, F. Considerations on nonlinear model predictive control techniques [Text] / F. Manenti // Computers and Chemical Engineering. – 2011. – № 35. – P. 2491-2509.
- 110 Oravec, J. Experimental investigation of alternative robust model predictive control of a heat exchanger [Text] / J. Oravec, M. Bakošová, A. Mészáros, N. Míková // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 105. – P. 774-782.
- 111 Chatrattanawet, N. Control structure design and robust model predictive control for controlling a proton exchange membrane fuel cell [Text] / N. Chatrattanawet, T. Hakhen, S. Kheawhom, A. Arpornwichanop // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 148. – P. 934-947.

112 Robertson, M.W. Model based control for reverse osmosis desalination processes [Text] / M.W. Robertson, J.C. Watters, P.B. Desphande, J.Z. Assef, I.M. Alatiqi // Desalination. – 1996. – № 104. – P. 59-68.

113 Manenti, F. Operational Optimization of Reverse Osmosis Plant Using MPC [Text] / F. Manenti, I.S. Nadezhdin, A.G. Goryunov, K.A. Kozin, S.A. Baydali, D. Papasidero, F. Rossi, R.V. Potemin // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – Vol. 45. – P. 247-252.

114 Bello, O. Coagulation process control in water treatment plants using multiple model predictive control [Text] / O. Bello, Y. Hamam, K. Djouani // Alexandria Engineering Journal. – 2014. – Vol. 53. – P. 939-948.

115 Дядик, В.Ф. Теория автоматического управления: учебное пособие [Текст] / В.Ф. Дядик, С.А. Байдали, Н.С. Криницын. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 196 с.

116 Буймистряк, Г.Я. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий [Текст] / Г.Я. Буймистряк // Сенсоры и датчики. – 2013. – № 3. – С. 35-40.

117 Culshaw, B. Optical fiber sensor technologies: opportunities and – perhaps – pitfalls [Text] / B. Culshaw // Journal of Lightwave Technology. – 2004. – Vol. 22. – P. 39-50.

118 Буймистряк, Г.Я. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем / Г.Я. Буймистряк. – СПб: ИВА, ГРОЦ Минатома, 2005. – 191 с.

119 Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы: Сборник статей / Под ред. С.А. Дмитриева. Издательство: Connect, 2000. – 376 с.

120 Payne, D.N. New silica based low-loss optical fibre [Text] / D.N. Payne, W.A. Gambling // Electron Lett. – 1974. – Vol. 15. – P. 289-290.

121 Оптические датчики физических величин. – Материалы НТС. / Под ред. Г.Я. Буймистряка, Кишинев, 1990. – 35 с.

- 122 Бутусов, М.М. Волоконная оптика в судовом приборостроении [Текст] / М.М. Бутусов, С.Л. Галкин. – Л.: Судостроение, 1990. – 82 с.
- 123 Ветров, А.А. Волоконно-оптические виброакустические датчики [Текст] / А.А. Ветров, А.Н. Сергушичев, А.А. Ширшов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 168 с.
- 124 Мурашкина, Т.И. Амплитудные волоконно-оптические датчики автономных систем управления [Текст] / Т.И. Мурашкина, В.И. Волчихин. – Пенза, ПГУ, 1999. – 186 с.
- 125 Бростилов, С.А. Волоконно-оптический датчик давления на основе туннельного эффекта [Текст] / С.А. Бростилов, Т.И. Мурашкина, Т.Ю. Бростилова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 4. – С. 106-117.
- 126 Мурашкина, Т.И. Волоконно-оптический датчик давления на туннельном эффекте [Текст] / Т.И. Мурашкина, А.Г. Пивкин, Е.А. Бадеева, А.В. Гориш, Т.Ю. Крупкина // Датчики и системы. – 2005. – № 8. – С.10-12.
- 127 Вознесенская, А.О. Амплитудный волоконно-оптический преобразователь отражательного типа для датчика давления [Текст] / А.О. Вознесенская // Известия вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 4. – С. 60-64.
- 128 Гармаш, В.Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении [Текст] / В.Б. Гармаш, Ф.А. Егоров, Л.Н. Коломиец, А.П. Неугольников, В.И. Поспелов // Спецвыпуск «Фотон-Экспресс» – Наука. – 2005. – № 6. – С. 128-140.
- 129 Taysom, B.S. A comparison of model predictive control and PID temperature control in friction stir welding [Text] / B.S. Taysom, C.D. Sorensen, J.D. Hedengren // Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 29. – P. 232-241.
- 130 Iancu, M. MPC vs. PID. The advanced control solution for an industrial heat integrated fluid catalytic cracking plant [Text] / M. Iancu, M.V. Cristea,

P.S. Agachi // Computer Aided Chemical Engineering. – 2011. – Vol. 29. – P. 517-521.

131     Saletovic, E. APM (Simple MPC) vs. PID – detailed comparison [Text] / E. Saletovic // International Journal of Advanced Computer Research. – 2014. – Vol. 4. – P. 26-31.

132     Shaaban, Y. A. PID versus MPC Performance for SISO Dead-time Dominant Processes [Text] / Y.A. Shaaban, B. Lennox, D. Lauri // Preprints of the 10<sup>th</sup> IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems. – 2013. – P. 241-246.

133     Balaji, V. Comparative study of PID and MPC controller using Lab View [Text] / V. Balaji, D.L. Rajaji // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2013. – Vol. 2. – P. 5545-5550.

134     Бушко, Д.А. Управление курсом движения морских подвижных объектов с использованием MPC и PID контроллера при параметрической неопределенности объекта управления [Текст] / Д.А. Бушко, С.С. Пашин // Вестник Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского. Серия: Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – 2014. – С. 3-9.

135     Abirami, S. Performance comparison of different controllers for a level process [Text] / S. Abirami, A.S. Zahir Hussain, D. Saravana Muthu, C.B. Aravind Kumar // Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4. – P. 341-344.

136     Kalman, R.E. Contribution to the theory of optimal control [Text] / R.E. Kalman // Boletín de la Sociedad Matemática Mexicana. – 1960. – Vol. 5. – P. 102-119.

137     Kalman, R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems [Text] / R.E. Kalman // Journal of Basic Engineering. – 1960. – P. 35-45.

138     Richalet, J. Algorithmic control of industrial processes [Text] / J. Richalet, A. Rault, J.L. Testud, J. Papon // In Proceedings of the 4<sup>th</sup> IFAC

symposium on identification and system parameter estimation. – 1976. – P. 1119-1167.

139 Cutler, C.R. Dynamic Matrix Control – A Computer Control Algorithm [Text] / C.R. Cutler, B.C. Ramaker // Automatic Control Conference, San Francisco. – 1980.

140 Mehdra, R.J. Model Algorithmic Control (MAC): Review and Recent Developments [Text] / R.J. Mehdra, R. Rouhani, J. Etemo // Eng. Foundation Conf. on Chemical Process Control, Sea Island, Georgia. – P. 287-310.

141 Rafal, M. D. Descrete Dynamic Optimization Applied to On-Line Optimal Control [Text] / M.D. Rafal, W.F. Stevens // AICHEH. – 1968. – № 14. – P. 85-91.

142 Clarke, D.W. Generalize d Predictive Control – Part II. Extensions and Interpretations [Text] / D.W. Clarke, C. Mohtadi, P.S. Tuffs // Automatica. – 1987. – Vol. 23. – P. 149-160.

143 Clarke, D.W. Constrained Receding – Horizon Predictive Control [Text] / D.W. Clarke, R. Scattolini // Proceedings IEE. – 1991. – Vol. 138. – P. 347-354.

144 Mayne, D.Q. Robust Receding Horizon Control of Constrained Nonlinear Systems [Text] / D.Q. Mayne, H. Michalska // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1993. – Vol. 38. – P. 1623-1633.

145 Muske, K.R. Model Predictive Control with Linear Models [Text] / K.R. Muske, J. Rawlings // AIChE Journal. – 1993. – Vol. 39. – P. 262-287.

146 Qin, S.J. A survey of industrial model predictive control technology [Text] / S.J. Qin, T.A. Badgwell // Control Engineering Practice. – 2003. – Vol. 93. – P. 733-764.

147 Valencia-Palomo, G. Programmable logic controller implementation of an autotuned predictive control based on minimal plant information [Text] / G. Valencia-Palomo, J. Rossiter // ISA Transactions. – 2011. – Vol. 50. – P. 92-100.

148 Tufa, L.D. Effect of model plant mismatch on MPC performance and mismatch threshold determination [Text] / L.D. Tufa, C.Z. Ka // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 148. – P. 1008-1014.

149    Rodríguez, M. First Principles Model Based Control [Text] / M. Rodríguez, D. Pérez // European Symposium on Computer Aided Process Engineering-15. – 2005.

150    Tran, M. The importance of first-principles, model-based steady-state gain calculations in model predictive control – a refinery case study [Text] / M. Tran, D.K. Varvarezos, M. Nasir // Control Engineering Practice. – 2005. – Vol. 13. – P. 1369-1382.

151    Brásio, A.S.R. First principle modeling and predictive control of a continuous biodiesel plant [Text] / A.S.R. Brásio, A. Romanenko, N.C.P. Fernandes, L.O. Santos // Journal of Process Control. – 2016. – Vol. 47. – P. 11-21.

152    Круг, Е.К. Электрические регуляторы промышленной автоматики [Текст] / Е.К. Круг, О.М. Минина. – Москва, Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 336 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Акт о внедрении результатов диссертационного исследования ООО «ТКГЭ»


**ТОМСКАЯ КОМПЛЕКСНАЯ  
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ**

ООО «Томская комплексная геологоразведочная экспедиция»  
634507, Томская область, Томский район, п. Зональная станция,  
база ООО «ТКГЭ», строение 10.  
ИНН 7017266227 КПП 701401001 Р/с № 407 028 100 640 0000 5353  
В Томском отделении № 8616 ПАО СБЕРБАНК  
К/с № 301 018 108 0000 0000 606 БИК 046902606 ОГРН 1107017013311  
web-сайт: tkge.net, e-mail: tkge@mail.ru, Тел./факс (3822) 90-08-43; 90-08-84

№ 91 от 15.02 2018 г


**Комиссия в составе:**

Председатель комиссии:  
Члены комиссии

Е.Н. Юдин  
А.И. Ламинский  
А.Г. Коровин

рассмотрела результаты работ, проведенных при непосредственном участии Надеждина Игоря Сергеевича, младшего научного сотрудника научно-образовательной лаборатории «Электроника и автоматика физических установок» Томского политехнического университета, по разработке системы управления электроэрозионной водоочистной установкой, вошедших в диссертационные исследования.

Надеждин И.С. являлся научным руководителем инициативного научного проекта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №16-31-00085 по теме «Математическое моделирование и оптимизация электроэрозионного метода очистки воды».

Комиссия подтверждает, что при непосредственном участии Надеждина И.С. была разработана система управления электроэрозионной водоочистной установкой на базе прогнозирующей модели, а также были сформулированы рекомендации по геометрическому исполнению бака-реактора аппарата.

Для повышения эффективности электроэрозионной водоочистной установки было предложено использовать бак-реактор в форме прямоугольного параллелепипеда, на двух противоположных сторонах которого размещаются электроды от генератора электрических импульсов. Также был разработан и внедрен алгоритм управления генератором электрических импульсов. Внедрение алгоритма управления позволило реализовать систему управления электроэрозионной водоочистной установкой, обеспечивающую снижение энергозатрат на процесс водоподготовки ООО «ТКГЭ».

По оценке комиссии, личный вклад Надеждина И.С. в результаты работ по созданию системы управления электроэрозионной водоочистной установкой составляет не менее 75 %.

Главный инженер ООО «ТКГЭ»

Е.Н. Юдин

Главный гидрогеолог ООО «ТКГЭ»

А.И. Ламинский

Главный механик ООО «ТКГЭ»

А.Г. Коровин

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2657711

**КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХИМИКО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет" (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2017120953

Приоритет изобретения 14 июня 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 14 июня 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 14 июня 2037 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Авторы: *Надеждин Игорь Сергеевич (RU), Горюнов Алексей  
Германович (RU), Дьяченко Александр Николаевич (RU),  
Бахтадзе Наталья Николаевна (RU), Быков Андрей  
Александрович (RU), Громов Олег Борисович (RU), Максимов  
Евгений Михайлович (RU), Михеев Пётр Иванович (RU), Травин  
Сергей Олегович (RU)*

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования  
ОАО «Манотомь»



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО Надежность наших приборов проверена временем

**МАНОТОМЬ**



пр. Комсомольский, 62, г. Томск, Россия, 634061  
Генеральный директор (3822) 44 26 28, факс (3822) 44 29 06, e-mail: priem@manotom.com  
Отдел продаж (3822) 28 88 99, 90 34 54, e-mail: sbt@manotom.com  
Группа маркетинга (3822) 28 88 79, 90 34 45, e-mail: marketing@manotom.com  
факс (3822) 44 28 43, 44 29 06  
http://www.manotom.com  
ОКПО 00225590 ИНН/КПП 7021000501/701701001

**made  
inTomsk**

03.05.2018 № 84/39  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



УТВЕРЖДАЮ:  
Генеральный директор ОАО «Манотомь»  
А.Ю. Гетц  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018

**Акт внедрения результатов диссертационных исследований Надеждина И.С.**

Комиссия Технического совета ОАО «Манотомь» в составе председателя –руководителя Технического совета – Технического директора ОАО «Манотомь» Стародубцева Д.Ю., руководителя конструкторско-технологической службы ОАО «Манотомь» Везнера С.М., научного эксперта к.т.н. Свинолупова Ю.Г. рассмотрела результаты работ, проведенных при непосредственном участии Надеждина Игоря Сергеевича, младшего научного сотрудника научно-образовательной лаборатории «Электроника и автоматика физических установок» Томского политехнического университета, по разработке интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя, и составила настоящий акт о внедрении этих результатов, вошедших в диссертационные исследования Надеждина И.С., на ОАО «Манотомь».

Надеждин И.С. является исполнителем государственного Задания №8.3079.2017/ПЧ Министерства образования и науки РФ и договора с индустриальным партнером ОАО «Манотомь» №18.14-92/2017 от 17.04.2017 г. по теме «Разработка интеллектуального датчика дифференциального давления с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации».

Комиссия подтверждает, что в соответствии с календарным планом Задания №8.3079.2017/ПЧ при непосредственном участии Надеждина И.С. был создан макет интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических методов, включающего в свой состав дифференциальный измеритель давления, и оптический измеритель концентрации, основанный на спектрофотометрическом методе.

Для снижения температурного влияния на чувствительный элемент дифференциального измерителя давления применено два взаимосвязанных оптических преобразователя. Использование оптоволоконных кабелей для передачи сигналов позволяет реализовать принцип удаленного измерения, обеспечивает надежность прибора, существенно снижает эксплуатационные расходы. Разработанный прибор будет использован для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации на базе ОАО «Манотомь».

По оценке комиссии, личный вклад Надеждина И.С. в результаты работ по созданию интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем составляет не менее 70%.

Технический директор ОАО «Манотомь»

Д.Ю.Стародубцев