На правах рукописи

Надеждин Игорь Сергеевич

Автоматизированная система управления электроэрозионной водоочистной установкой с прогнозирующей моделью

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в научно-образовательной лаборатории «Электроника и автоматика физических установок» (НОЛ ЭАФУ) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Научный руководитель	**Горюнов Алексей Германович**, доктор технических наук, доцент
Официальные оппоненты	**Ганджа Тарас Викторович** доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, г. Томск
	Макеева Инга Равильевна кандидат физико-математических наук, ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», начальник лаборатории, г. Снежинск
Ведущая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Защита состоится «13» декабря 2018 г. в __:__ на заседании диссертационного совета Д 212.269.14 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 2, 10-й корпус, ауд. ___.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ, расположенной по адресу: г. Томск, ул. Белинского, д. 53а и на сайте http://portal.tpu.ru/council/4060/worklist.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.Г. Видяев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Особенно актуальной задачей это является для технологических процессов химический, атомной, нефте- и газоперерабатывающей промышленностей, 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. 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. В связи с этим, в последнее время, интерес исследователей направлен на применение электрической энергии для очистки водных источников. 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.

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); 7-ой 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); 8-ой 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 при Министерстве 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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

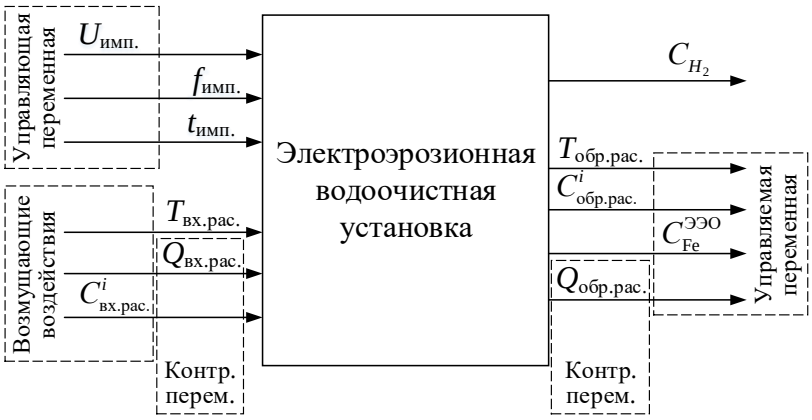
В первом разделе произведен обзор и анализ работ, посвященных электроэрозионному процессу и его применению в промышленности. В опубликованных работах показано, что применение электрической эрозии для очистки природных и сточных вод является перспективным направлением. Главная цель применения электроэрозионного процесса для очистки воды заключается в том,

чтобы перевести растворенные в воде вредные примеси в нерастворимый осадок. Очистка воды на основе электрической эрозии заключается в следующем. В межэлектродное пространство бака-реактора электроэрозионной водоочистной установки загружают металлические шарики. Исходный водный раствор, предназначенный для очистки от вредных примесей, поступает 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 (≈20–25 мкс), в результате которых, в местах соприкосновения шариков друг с другом, возникают электрические разряды, характеризующиеся большой энергией. В результате этих разрядов на поверхности металлических шариков происходит процесс электрической эрозии и выброс продуктов эрозии в межгранульные промежутки, заполненные обрабатываемой водой. Затем обработанная вода поступает в бак-отстойник, где протекают все химические процессы. Продукты электрической эрозии окисляются водой и растворенным в ней кислородом, образуя активные гидроксиды и оксиды металла, которые эффективно сорбируют примеси, содержащиеся в воде и образуют не растворимые соединения, выпадающие в осадок и извлекаемые из обработанной воды классическими методами.

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 требуемой производительности аппарата и типа загрязнителя. На количество и размеры образующихся продуктов электрической эрозии влияет электропроводность обрабатываемого водного раствора, которая зависит от концентрации растворенных в нем вредных примесей. 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.

Для синтеза системы управления электроэрозионной водоочистной установкой необходима математическая модель процесса как объекта управления. 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, возникла необходимость в разработке математической модели электроэрозионного процесса очистки воды как объекта управления. Для этого были определены основные входные и выходные переменные и разработана информационная структура электроэрозионной водоочистной установки как объекта управ-

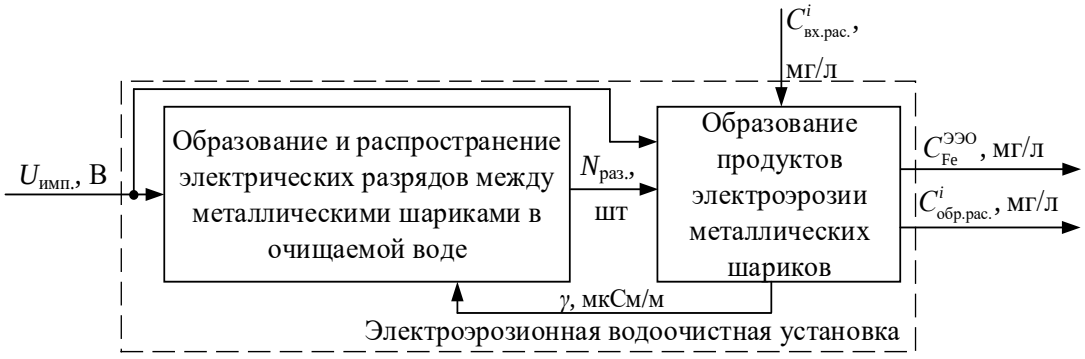
ления (рисунок 1). В качестве управляющей переменной выбрано напряжение подаваемых электрических импульсов, в качестве возмущающего воздействия выделена концентрация вредных примесей, содержащихся в исходном водном растворе, а контролируемой переменной является концентрация образующихся продуктов электрической эрозии.



$U_{имп.}$, $f_{имп.}$, $t_{имп.}$ – напряжение, частота и длительность электрических импульсов; $Q_{вх.рас.}$, $T_{вх.рас.}$ – расход и температура входного водного раствора; $C^i_{вх.рас.}$ – концентрация примесей во входном водном растворе; C_{H_2} – концентрация водорода в воздухе помещения, в котором работает установка; $C^i_{обр.рас.}$ и $C^{ЭЭО}_{Fe}$ – концентрация примесей и продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе; $Q_{обр.рас.}$, $T_{обр.рас.}$ – расход и температура обработанного водного раствора

Рисунок 1 – Информационная структура электроэрозионной водоочистной установки как объекта управления

Основным требованием, предъявляемым к разрабатываемой математической модели электроэрозионного процесса очистки воды, является описание связей между входными и выходными переменными с учетом динамики физико-химических процессов, происходящих в аппарате. На основании проведенного анализа процесса были выделены основные стадии протекания процесса и разработана информационная модель электроэрозионного процесса очистки воды как объекта моделирования (рисунок 2).



$N_{раз.}$ – количество разрядов, возникающих между металлическими шариками, загруженными в межэлектродное пространство установки; γ – электрическая проводимость водного раствора

Рисунок 2 – Информационная модель электроэрозионной водоочистной установки как объекта моделирования

Во втором разделе, на основании предъявленных требований и принятых допущений была разработана математическая модель электроэрозионного процесса водоочистки. Разработанная математическая модель состоит двух взаимосвязанных математических моделей для каждой стадии процесса (рисунок 2).

Для моделирования процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе был использован метод вероятностных клеточных автоматов. Суть предложенного подхода заключается в следующем. Расположение металлических шариков в аппарате соответствует

гексагональной решетке клеточных автоматов, где каждая клетка автомата соответствует шарику. Клетки автомата могут принимать два значения, первое говорит о том, что разряд прошел через клетку (шарик), а второе свидетельствует об обратном. При этом межэлектродное пространство, заполненное шариками, было представлено как последовательно-параллельная цепь из резисторов. Причем сопротивлением обладают не только шарики, загруженные в аппарат, но и пленки водного раствора, имеющиеся между ними. Процесс возникновения электрических разрядов между шариками определяется толщиной этих пленок, так как от этого зависит величина напряжения, необходимого для возникновения пробоя. Также электропроводность водного раствора зависит от концентрации вредных примесей. Толщина водной пленки между шариками, зависит от их расположения в аппарате. Если рассматривать гексагональную решетку расположения шариков в одном слое, то шарики, находясь в своих ячейках, являются смещенными в какую-то сторону (рисунок 3).

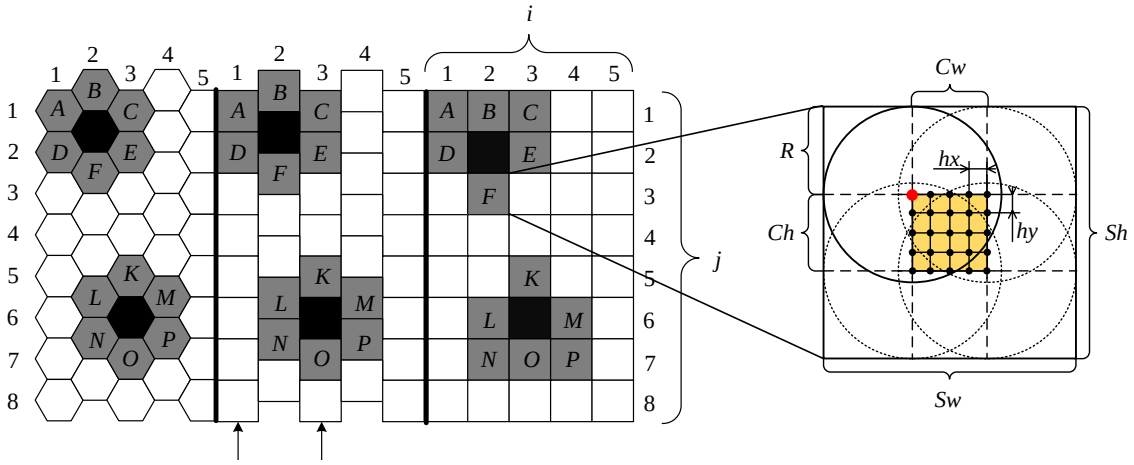


Рисунок 3 – Гексагональная решетка клеточных автоматов, ее преобразование в прямоугольную и расположение шариков в ячейках автомата

Кроме того, возникновение разрядов на границе потенциального электрода и шариков также зависит от расположения шариков в аппарате. В месте, где шарики более тесно прилегают к электроду, возникает первый разряд. В процессе прохождения электрических разрядов, положение центров шариков смещается от начального положения случайным образом. Для описания расположение шариков в аппарате был использован метод вероятностных клеточных автоматов. Каждая шарик-ячейка определена тремя координатами: по ширине, высоте и длине межэлектродного пространства. Эти координаты определяются случайным образом перед каждым электрическим импульсом, имитируя перераспределение шаров под действием ударной волны. Напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве является неоднородной и зависит от геометрии аппарата и напряжения импульсов, подаваемых на электроды установки. Законы эволюции клеточного автомата следуют из предложенной резистивной схемы и представлены на рисунке 4. 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 и определяется количество разрядов ($N_{\text{раз.}}$), вызванных одним электрическим импульсом.

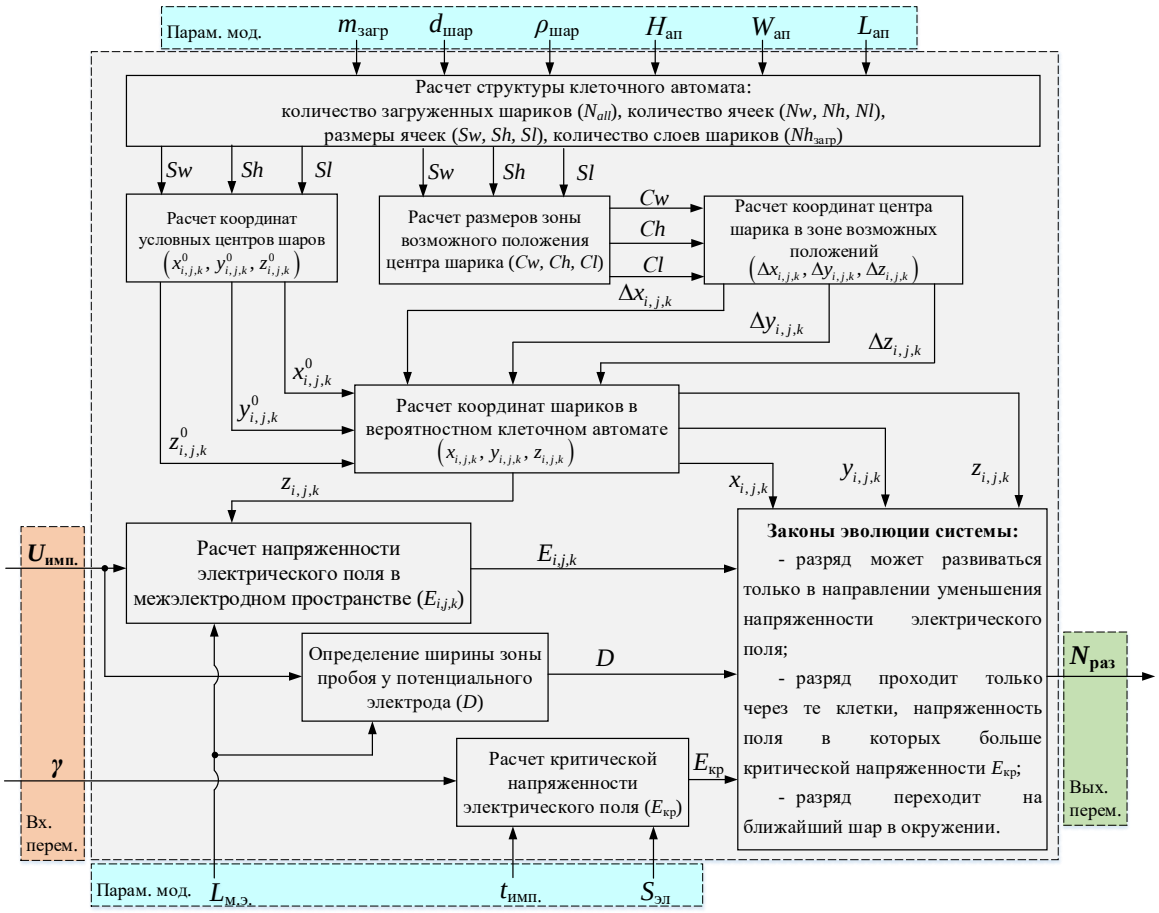


Рисунок 4 – Информационная структура математической модели процесса распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе

Математическая модель процесса образования продуктов электрической эрозии и изменения их концентрации в аппарате описывается системой дифференциально-алгебраических уравнений (1).

$$
\begin{cases}
\dfrac{\mathrm{d}C^{i}_{\text{обр.рас.}}}{\mathrm{d}t} = \dfrac{Q_{\text{обр.рас.}}}{V_{\text{в.р.}}} \cdot \left(C^{i}_{\text{вх.рас.}} - C^{i}_{\text{обр.рас.}} \right), \\
\dfrac{\mathrm{d}C^{\text{ЭЭО}}_{\text{Fe}}}{\mathrm{d}t} = \dfrac{m^{\text{ЭЭО}}_{\text{Fe}}}{V_{\text{в.р.}}} - \dfrac{Q_{\text{обр.рас.}}}{V_{\text{в.р.}}} \cdot C^{\text{ЭЭО}}_{\text{Fe}}, \\
\dfrac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}t} = \dfrac{C^{i}_{\text{обр.рас.}}}{k_{\gamma}}, \\
\dfrac{\mathrm{d}m^{\text{ЭЭО}}_{\text{Fe}}}{\mathrm{d}t} = 2 \cdot N_{\text{раз}} \cdot V_{\text{лун}} \cdot \rho_{\text{шар}}, \\
V_{\text{лун}} = 0,5 \cdot \pi \cdot R^{2}_{\text{лун}} \cdot h_{\text{лун}}, \\
d_{\text{лун}} = \left(73,96 \cdot d^{2}_{\text{шар}} - 930,1 \cdot d_{\text{шар}} + 3602 \right) \cdot q^{0,2309}_{\text{кан}} + \left(27,16 \cdot d^{2}_{\text{шар}} + 218,1 \cdot d_{\text{шар}} - 278,4 \right), \\
h_{\text{лун}} = q_{\text{плав}} \cdot \left(c_{\text{шар}} \cdot \left(T_{\text{плав}} - T_{\text{шар}} \right) \cdot \rho_{\text{шар}} \right)^{-1}, \\
q_{\text{плав}} = 4,45 \cdot k_{\text{эф}} \cdot q_{\text{кан}} \cdot \left(\pi \cdot R^{2}_{\text{лун}} \right)^{-1}.
\end{cases}
\tag{1}
$$

Будучи реализованной в пакете MatLab, модель отражает динамику изменения продуктов электрической эрозии в водоочистной установке в зависимости от напряжения подаваемых электрических импульсов и концентрации вредных примесей, содержащихся в исходном водном растворе.

Проверка адекватности, разработанной математической модели, была произведена путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных. При этом была произведена проверка адекватности математической модели первой стадии процесса (рисунок 5). В аппарат, заполненный водой с известной электропроводностью, были загружены металлические шарики в один слой. Через загруженные шарики пропускались единичные электрические импульсы определенной амплитуды. В результате исследований было сделано порядка 30 экспериментов для каждого межэлектродного промежутка. Были рассчитаны вероятности возникновения разного числа разрядных траекторий для каждого из межэлектродных расстояний. Согласно полученным данным, при межэлектродном расстоянии 100 мм характерным является возникновение 3 разрядных «дорожек», а при межэлектродном расстоянии 180 мм – 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 порядка 6 %. Для проверки адекватности разработанной математической модели, для объемной загрузки аппарата, было произведено сравнение расчетных значений накопленных продуктов эрозии со значениями, полученными в ходе экспериментальных исследований (рисунок 6). Для оценки расхождения между расчетными и экспериментальными данными было рассчитано приведенное среднеквадратическое отклонение, которое составило 5,6 %, что позволяет считать разработанную модель адекватной и использовать ее для дальнейшей работы.

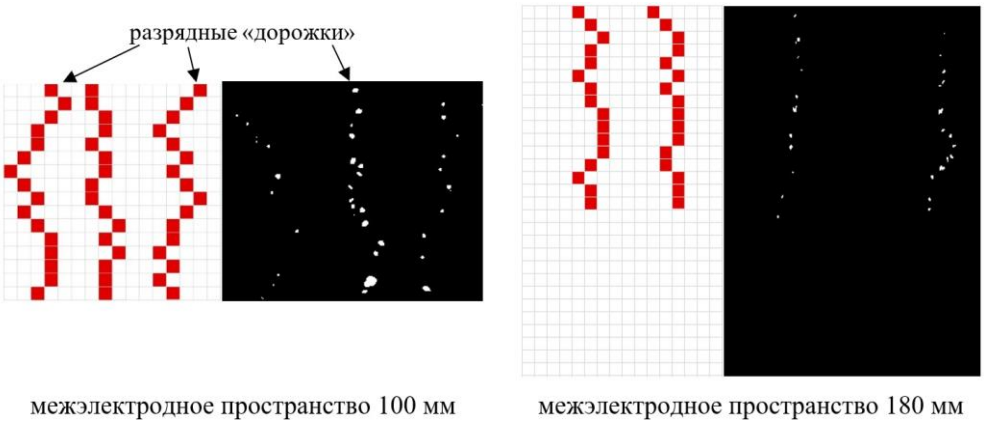


Рисунок 5 – Результаты моделирования и фотографии межэлектродного пространства

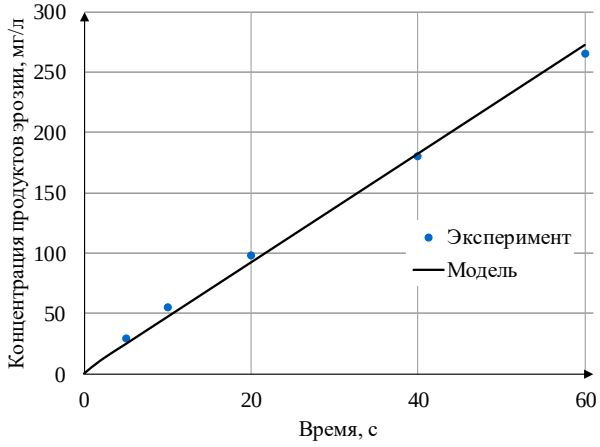
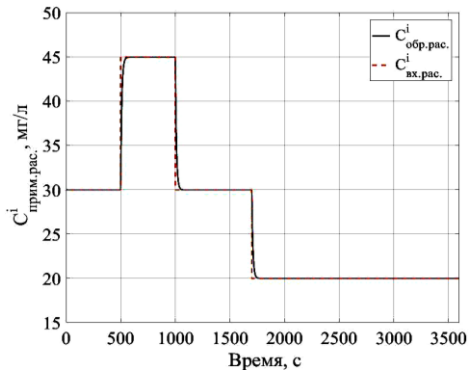
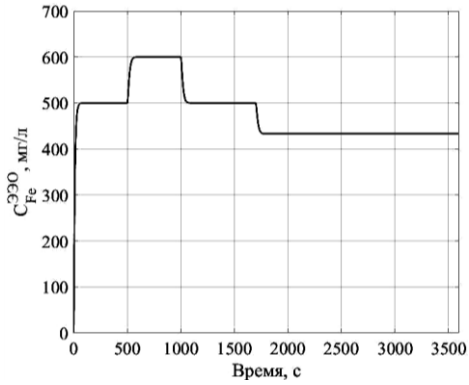


Рисунок 6 – Изменение концентрации продуктов эрозии в воде в зависимости от продолжительности обработки

Используя компьютерную модель было произведено моделирование электроэрозионного процесса очистки воды производительностью 1 м^3/ч (рисунок 7). В процессе моделирования было произведено ступенчатое изменение концентрации вредных примесей, содержащихся в исходном водном растворе.



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

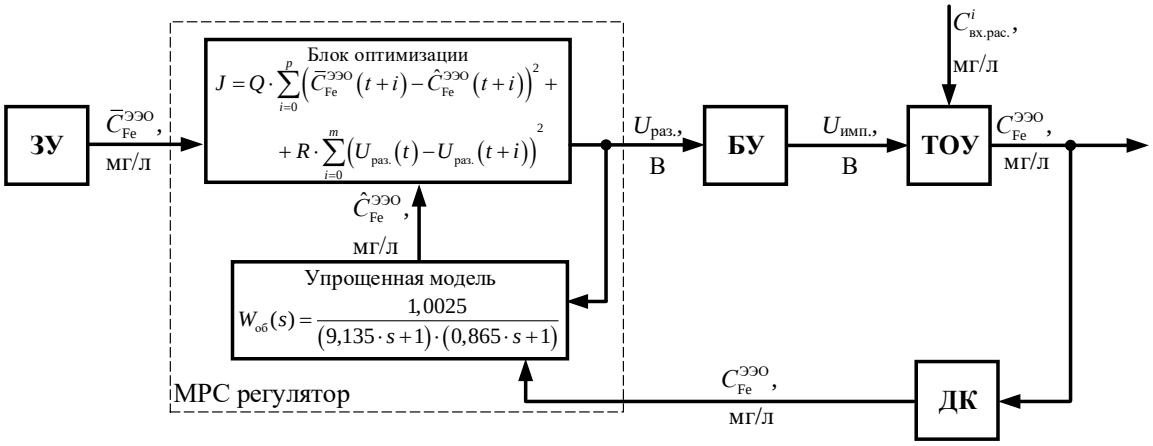


Изменение концентрации продуктов электрической эрозии в обрабатываемом водном растворе в аппарате

Рисунок 7 – Результаты моделирования

В момент времени 500 секунд концентрация примесей в исходном растворе была увеличена с 30 мг/л до 45 мг/л. Следствием этого возмущающего воздействия явилось увеличение концентрации образующихся продуктов электрической эрозии. Так как в результате увеличения концентрации вредных примесей увеличилась электропроводность водного раствора, то соответственно снизилось минимальное необходимое напряжение, для возникновения пробоя, 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. Поэтому образование продуктов эрозии больших размеров является не желательным. В момент времени 1700 секунд концентрация примесей в исходном растворе уменьшилась с 30 мг/л до 20 мг/л. 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 в баке-отстойнике, необходимо поддерживать концентрацию продуктов электрической эрозии на постоянном заданном уровне. Для решения этой задачи целесообразно использовать систему управления.

В третьем разделе разработана функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой (рисунок 8).



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

Рисунок 8 – Функциональная схема автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой

Для измерения концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе был разработан оптический датчик с применением оптоволоконных кабелей (рисунок 9). Принцип действия разработанного оптического датчика заключается в следующем. Исходный водный раствор проходит через эталонную кювету (1) и поступает в бак-реактор. После обработки в баке-реакторе водный раствор проходит через измерительную кювету (2). При этом, через эталонную (1) и измерительную (2) кюветы от оптического излучателя (3) через разветвитель светового потока (4) пропускается световой поток с определенной длиной волны. Управление 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.

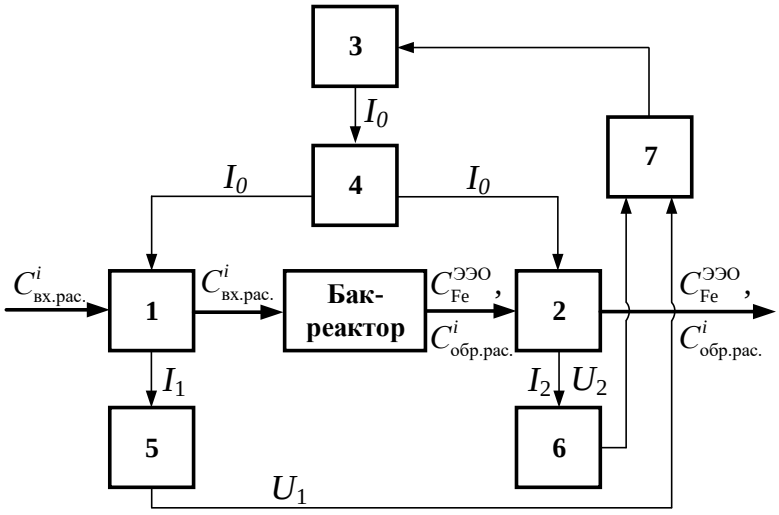


Рисунок 9 – Схема оптического датчика

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 10 представлена градуировочная характеристика оптической измерительной системы, предназначенной для измерения концентрации продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе.

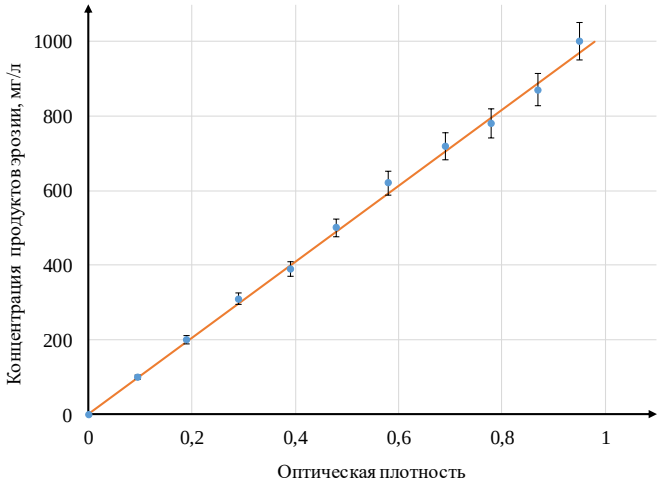


Рисунок 10 – Градуировочная характеристика оптической измерительной системы

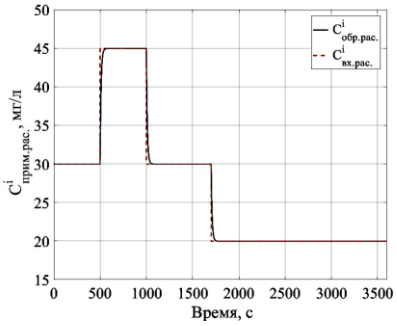
В настоящее время наиболее распространенными подходами в управлении технологическими процессами являются применение ПИД-регуляторов и регуляторов на базе прогнозирующих моделей (Model Predictive Control – MPC). На основании проведенных исследований и литературного обзора был сделан вывод о том, что для 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 (MPC регулятор). 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. Основной особенностью управления с прогнозирующей моделью является наличие математической модели объекта управления, которая достаточно точно описывает его поведение.

Для синтеза регулятора с прогнозирующей моделью была разработана упрощенная математическая модель электроэрозионной водоочистной установки по каналу управления (2).

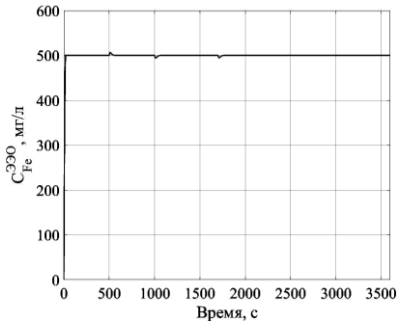
$$W_{об}(s) = \frac{1,025}{(9,135 \cdot s + 1) \cdot (0,865 \cdot s + 1)} \qquad (2)$$

Исследование, разработанной системы управления электроэрозионной водоочистной установки, было произведено в пакете MatLab с использованием разработанной ранее компьютерной модели и блока MPC регулятора (рисунок 11). Моделировался электроэрозионный процесс очистки воды производительностью 1 м^3/ч. Использование разработанной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой на базе MPC регулятора позволило стабилизировать концентрацию продуктов электрической эрозии на постоянном заданном уровне, при внесении возмущающих воздействий. Используя разработанную компьютерную модель было произведено определение оптимальных па-

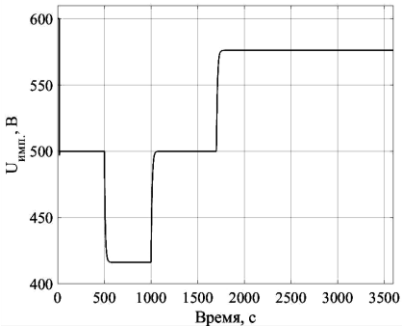
раметров MPC регулятора, а именно горизонта предсказания и горизонта управления.



Изменение концентрации вредных примесей в очищаемом водном растворе



Изменение концентрации продуктов электрической эрозии в обрабатываемом водном растворе

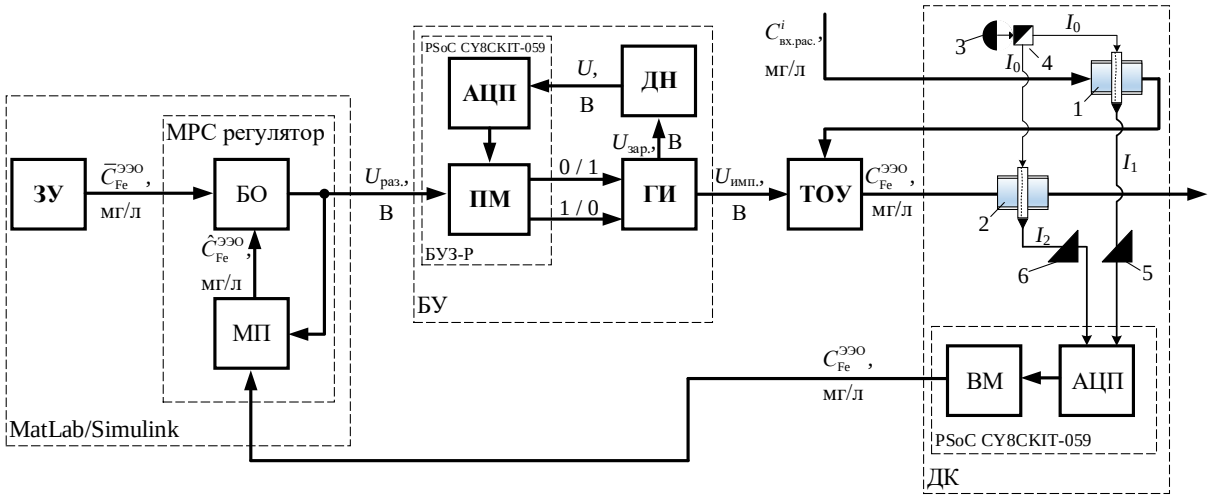


Изменение напряжения подаваемых электрических импульсов

Рисунок 11 – Результаты моделирования

При увеличении горизонта предсказания максимальное отклонение управляемой переменной уменьшается. Однако исходя из требуемых вычислительных мощностей для функционирования MPC регулятора, целесообразно выбрать горизонт предсказания равным 10, так как дальнейшее увеличение этого параметра существенно не влияет на максимальное отклонение управляемой переменной. 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.

В четвертом разделе представлены результаты практической реализации разработанной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой (рисунок 12).



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 12 – Функциональная схема реализованной автоматизированной системы управления электроэрозионной водоочистной установкой на базе MPC регулятора

Разработанная система управления была внедрена в процесс водоподготовки ООО «Томская комплексная геологоразведочная экспедиция», о чем свидетельствует соответствующий акт о внедрении. 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 и оптимизации химико-технологических процессов с применение адаптивной прогнозирующей модели процесса (рисунок 13). В качестве объекта управления выступает химический реактор. Сущность развитого принципа управления заключается в том, что с помощью контрольно-измерительных приборов (КИП) происходит контроль параметров процесса ($k_i(t)$) протекающего в химическом реакторе (ХР), а также управляемой переменной ($x(t)$). На основании данных об изменении параметров объекта управления ($k_i(t)$) корректируются параметры модели процесса (МП). 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 МП, то контроль $k_i(t)$ не осуществляется. Текущее значение управляемой переменной $x(t)$, формирует начальные условия для МП, с помощью которой осуществляется расчет реакции объекта управления $\hat{x}(t)$ на управляющее воздействие рассчитанное с помощью блока оптимизации (БО) $r(t)$. В БО происходит оптимизация функционала, базирующегося на сигнале рассогласования $\varepsilon(t)$, который генерируется блоком рассогласования (БР). В БР находится разница между желаемым значением контролируемой переменной $g(t)$ и значением контролируемой переменной, полученным в результате расчетов с помощью прогнозирующей модели $\hat{x}(t)$. С помощью задающего устройства (ЗУ) задается желаемое значение ($g(t)$) для управляемой переменной (уставка). На основании рассчитанного оптимального воздействия ($r(t)$), блок управления (БУ) формирует управляющее воздействие ($u(t)$) на объект управления. Отличительной особенностью развитого принципа управления является наличие адаптивной прогнозирующей модели процесса.

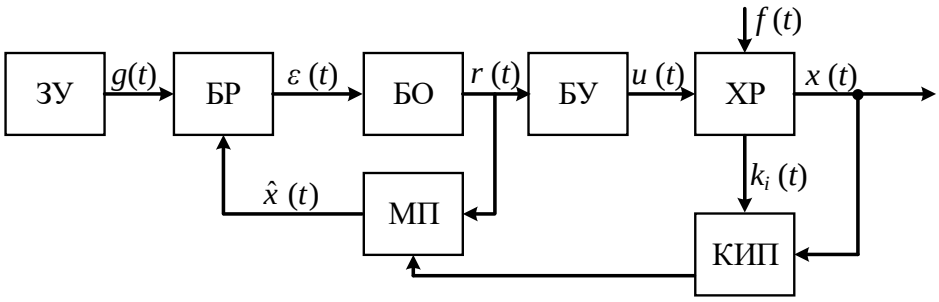


Рисунок 13 – Функциональная схема системы управления химико-технологическими процессами на базе адаптивной прогнозирующей модели

Для контроля нескольких технологических параметров химико-технологического процесса, был разработан интеллектуальный многопараметрический измерительный преобразователь на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных кабелей (рисунок 14). Принцип действия разработанного устройства заключается в следующем.

На технологической линии, предназначенной для перекачки растворов, устанавливается сужающее устройство (1), например, сопло Вентури, капилляр для микрорасходов и т.п. 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.

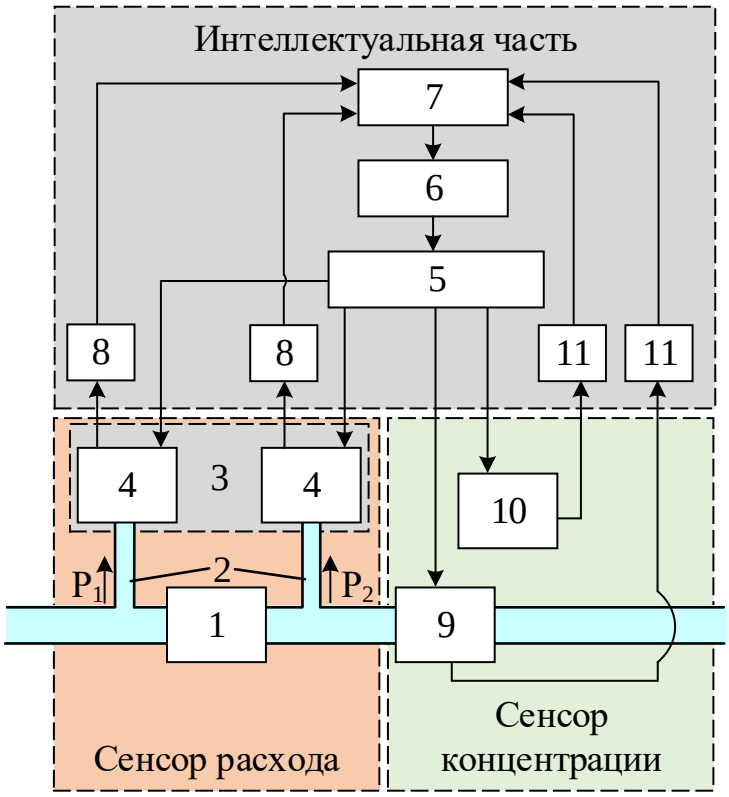


Рисунок 14 – Структурная схема интеллектуального многопараметрического измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем с применением оптоволоконных кабелей

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.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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

В ходе решения данной задачи лично автором были получены следующие основные результаты:

1. 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.
2. На базе предложенной математической модели разработана автоматизированная система управления электроэрозионной водоочистной установкой, позволяющая стабилизировать концентрацию продуктов электрической эрозии в обработанном водном растворе с помощью контроля концентрации оптическим датчиком.
3. 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 (патент на изобретение № 2657711).
4. Результаты диссертационной работы были внедрены в автоматизированную систему управления электроэрозионной водоочистной установкой ООО «Томская комплексная геологоразведочная экспедиция», а также будут использованы для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации на базе ОАО «Манотомь», о чем свидетельствуют соответствующие акты.
5. Диссертационные исследования по моделированию процесса были выполнены при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта № 16-31-00085 мол_а «Математическое моделирование и оптимизация электроэрозионного метода очистки воды», а разработка измерительного преобразователя на базе оптических измерительных систем была выполнена в рамках государственного задания № 8.3079.2017/ПЧ Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

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

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

3. Надеждин, И.С. Система управления электроэрозионной водоочистной установкой на базе МРС регулятора / И.С. Надеждин, А.Г. Горюнов // Приборы. – 2018. – № 5. – С. 21-26.

Документы, подтверждающие наличие исключительных прав на объекты интеллектуальной собственности:

4. 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.

Публикации в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science:

5. Nadezhdin, I.S. Operational Optimization of Reverse Osmosis Plant Using MPC / 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.

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

7. Nadezhdin, I.S. Control Systems of a Non-stationary Plant Based on MPC and PID Type Fuzzy Logic Controller / 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.

8. Nadezhdin, I.S. Mathematical modeling of EDM method of water purification / 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.

9. Nadezhdin, I.S. Plant Identification in the Closed-loop Control System / 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.

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

11. Nadezhdin, I.S. Passive Identification is Non Stationary Objects With Closed Loop Control / 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.

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

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

Другие издания:

14. Nadezhdin, I.S. Fuzzy adaptive control system of a non-stationary plant with closed-loop passive identifier / 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.

Тезисы докладов на международных конференциях:

15. Надеждин, И.С. Адаптивная система с пассивной идентификацией параметров объекта управления в замкнутом контуре с применением имитационной модели / А.Г. Горюнов, В.Ф. Дядик, И.С. Надеждин, Ф. Маненти // Сборник трудов 7-ой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». – 2015. – С. 43-48.

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

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

18. Надеждин, И.С. Применение клеточных автоматов для моделирования распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе / И.С. Надеждин, А.Г. Горюнов // Сборник трудов 8-ой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». – 2017. – С. 485-490.

19. Надеждин, И.С. Система управления электроэрозионной водоочистной установкой / 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.

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

Отчеты о НИР:

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

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