

УДК 303.732.4

На правах рукописи



Пономарёв Дмитрий Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА
ДЕЗОДОРАЦИИ ВОДЫ НА ГОРОДСКИХ ОЧИСТНЫХ
СООРУЖЕНИЯХ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в науке и технике)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Исаков Виталий Германович, ФГБОУ ВО
«Ижевский государственный технический
университет имени М.Т. Калашникова»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Колодкин Владимир Михайлович, ФГБОУ ВО
«Удмуртский государственный университет»,
директор Института гражданской защиты;

доктор технических наук, профессор
Попов Александр Николаевич, ФГБУ
«Российский научно-исследовательский институт
комплексного использования и охраны водных
ресурсов», Директор отдела научно-
методического обеспечения восстановления и
охраны водных объектов;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»

Защита состоится «16» марта 2017 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова по адресу: 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2, 5 корпус.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», <http://istu.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2017 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.065.06
Кандидат технических наук, доцент



В.Н.Сяктерев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. На сегодняшний день на фоне увеличивающегося негативного антропогенного воздействия на окружающую среду наблюдается ухудшение состояния многих источников питьевого водоснабжения по широкому спектру показателей, в частности, таких как органолептические свойства воды. Как следствие, возникает проблема и для питьевой воды. Общепринятым решением в данной области является углевание воды порошкообразными активированными углями (ПАУ): их применение не требует значительных инвестиций и реконструкции очистных сооружений, а так же может быть использовано на любых сооружениях водоподготовки.

Тем не менее, данный вопрос является до сих пор актуальным, а именно: отсутствуют рекомендации по выбору параметров дезодорации (марки активированного угля и их смесей, его оптимального дозирования и выбора времени контакта в зависимости от параметров исходной воды).

Проведение экспериментальных исследований дезодорации питьевой воды непосредственно на очистных сооружениях является довольно дорогостоящим процессом с необходимостью привлечения практически всех ресурсов предприятия и вероятностью нарушения водоснабжения города, что является недопустимым. Поэтому перспективным в данной области представляется проведение исследований на теоретическом уровне, а именно - разработка математической модели: это позволит сэкономить ресурсы, изучить процессы во времени с возможностью их прогнозирования, а так же выявить общие закономерности. Особый интерес представляет применение искусственной нейронной сети (ИНС): в отличие от линейных методов статистики она позволяет создать нелинейные зависимости и тем самым более точно описывать рассматриваемые процессы. Кроме того, нейронная сеть обучается на всей выборке, не фрагментируя её, что повышает точность результатов.

Степень разработанности работы. Проблема дезодорации воды и применение сорбентов рассматривались в работах Малыгина К.А., Цхе А.А., Рогалева Л.В., Смагной Н.А., Сапиной Н.В., Гандуриной Л.В., Сомина В.А., Кутковец А.А., Трусовой В.В., Грун Н.А., Гутенева В.В., Смирнова А.Д., Климова Е.С. и др.

Применение моделирования к проблемам дезодорации и систем водоснабжения, рассматривались в работах Гусева Е.Е., Енютинской С.Г., Герасимова М.М., Когановского А.М., Клименко Н.А., Коваленко В.Н., Малышевского В.А. и др.

Применение искусственных нейронных сетей рассматривались в работах А.С. Ефремова, А.Ю. Горнова, А.Н. Васильева, С.А. Проказова, А.А. Макаренко, З.И. Сичинава, А.Л. Оганезова, М.Г. Тиндовой, С.А. Дягтерева, М.А. Шулаковой, М.П. Коваленко, Б.А. Якимовича, В.А. Тененева и т.д.

Вопросами дезодорации воды от неприятного запаха занимаются практически все предприятия водоснабжения и водоподготовки (особенно остро проблема поднималась на МУП «Ижводоканал» и СПВ «Пруд-Ижевск», АО «Мосводоканал», МУП «Пермводоканал» и др.), а так же ГУП «Институт «МосводоканалНИИпроект», конструкторско-технологический институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии «НИИ ВОДГЕО», Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН), Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук (ИВПС КарНЦ РАН) и т.д.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности и моделирование значений параметров процесса дезодорации воды на городских очистных сооружениях. Исходя из поставленной цели были сформированы **задачи** диссертационного исследования:

1. Анализ проблемы дезодорации воды на городских сооружениях и пути ее решения в условиях эвтрофированных водоисточников.
2. Корреляционный анализ данных для значений показателей исходной и питьевой воды и разработка регрессионной модели на его основе для процесса дезодорации воды.
3. Разработка модели основных параметров дезодорации воды с использованием нейронных сетей на основе многослойного персептрона.
4. Проверка работоспособности разработанной модели и возможность ее применения в качестве инструмента по оптимизации процесса дезодорации питьевой воды.

Объект исследования. В качестве объекта исследования выступают процессы дезодорации природных поверхностных вод на очистных сооружениях.

Предмет исследования. Предметом исследования выступают методы оценки эффективности и моделирования параметров процесса дезодорации.

Научная новизна

1. Разработан при помощи корреляционного анализа данных и регрессионного моделирования метод оценки эффективности технологической схемы предприятия по очистке воды от одорирующих веществ с возможностью моделирования показателей воды (концентрации геосмина, хлороформа и хлоридов).
2. Разработана при помощи искусственной нейронной сети и регрессионного анализа модель, позволяющая в зависимости от качества исходной воды определить дозировку, адсорбционную активность, время контакта для активированного угля.

3. Впервые результаты разработанной модели параметров процесса дезодорации при помощи искусственной нейронной сети и регрессионного анализа применены в качестве инструмента по совершенствованию процесса дезодорации на очистных сооружениях.

4. Впервые разработан и запатентован способ оценки риска размножения сине-зеленых водорослей с помощью математического метода пошаговой регрессии, направленный на повышение качества оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработан метод позволяющий повысить точность определения параметров дезодорации воды на очистных сооружениях (дозирование сорбента, время контакта сорбента с водой, выбор адсорбционной активности).

Разработан метод позволяющий определить эффективность технологической схемы очистных сооружений водоподготовки.

Доказана перспективность использования методов моделирования к проблеме дезодорации воды. Результаты могут быть использованы в учебном процессе по специальности 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» и смежным специальностям для расчета параметров дезодорации питьевой воды.

Разработанные научно-методические основы были использованы при выполнении НИР по договорам ВиВ-1-14/С и ВиВ-2-15/С для МУП «Ижводоканал».

Методы исследования. В решении задач использовались методы системного анализа - применены статистические методы и методы моделирования: корреляционный, дисперсионный, регрессионный анализ, построение и обучение искусственных нейронных сетей; так же использовались физико-химические уравнения.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Разработанный способ оценки риска размножения сине-зеленых водорослей с помощью математического метода пошаговой регрессии, направленный на повышение качества оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме (патент № 2559561 RU).

2. Разработанный метод оценки эффективности технологической схемы предприятия по очистке воды от одорирующих веществ с возможностью моделирования показателей питьевой воды (таких как концентрации геосмина, хлороформа, хлоридов) на основе корреляционного анализа данных и регрессионного моделирования.

3. Разработанная при помощи искусственной нейронной сети и регрессионного анализа модель, позволяющая в зависимости от качества исходной воды определить дозировку, адсорбционную активность, время

контакта для активированного угля, тем самым сокращая его остаток и оптимизируя процесс при сезонной очистке воды от одорирующих веществ.

4. Разработанная методика, позволяющая адаптировать систему водоочистки к изменяющимся параметрам источников питьевого водоснабжения, базирующаяся на нейрорегрессионном моделировании.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением в работе научно-обоснованных методов экспериментальных и теоретических исследований; корректностью использования физико-химических законов; применением теоретически обоснованных методов системного анализа сложных прикладных объектов исследования, включая вопросы анализа, моделирования, оптимизации, совершенствования принятия решений.

Публикация результатов. Результаты исследований отражены в 23 работах, в том числе 3 статьи [1 - 3] опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК; 1 патент на изобретение [4]; 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [5 - 8]. В статье [3] соискателю принадлежит разработка нейрорегрессионной модели дезодорации воды на основе многослойного персептрона. В статьях [1, 2] соискателю принадлежит разработанная регрессионная модель значений концентрации геосмина в питьевой воде. В работах [4 - 8] соискателю принадлежат разработанная модель оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме и модель значений концентраций одорирующих веществ в питьевой воде. Остальные результаты в работах по теме диссертационного исследования принадлежат соавторам.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на конференциях и семинарах: V International research and practice conference (Канада, Вествуд, 2014 год); The 1st International Academic Conference (Австралия, Мельбурн, 2014 год); Международная научно-практическая конференция по проблемам экологического образования МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 2013 год); Вторая Всероссийская научно-практическая конференция (Саратов, 2013 год); Пятая Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (Уфа, 2015 год); Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Томск, 2015); Вторая научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых (Ижевск, 2013 год); Третья Региональная научно-практическая экологическая конференция преподавателей и студентов (Ижевск, 2013 год); Третья Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием (Ижевск, 2015 год).

Личный вклад состоит в постановке и реализации задач на всех этапах исследования, подготовке основных публикаций по выполненной работе, непосредственном участии в разработке изобретения (патент №2559561 RU) и программ для ЭВМ (свидетельства №2014662091 RU, №2015619352 RU, №2015661214 RU, №2015661548 RU) по теме диссертационного исследования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 119 страницах и содержит 29 рисунков, 33 таблицы, 3 приложения, библиографические ссылки из 152 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость результатов. Приведены основные положения выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена проблема очистки воды в системе питьевого водоснабжения, проанализированы и выявлены основные причины возникновения запаха питьевой воды (рисунок 1).



Рисунок 1 – Основные причины возникновения запаха питьевой воды

Анализ методов очистки воды от неприятного запаха в системе питьевого водоснабжения показал, что одним из перспективных решений проблемы является применение методов дезодорации с использованием сорбентов, например, таких как активированный уголь. Основными его преимуществами являются: дешевизна, возможность сезонного применения, высокая адсорбционная активность (до 225 мг/г), возможность применения в любом узле технологической схемы, кроме того, не нужно реконструировать существующие сооружения водоочистки.

Рассмотрена проблема системы водоснабжения в условиях эвтрофированных водоисточников и работа предприятий по дезодорации питьевой воды на примере Ижевского водохранилища. Технологическая схема системы водоочистки на рассматриваемом предприятии представлена на рисунке 2.

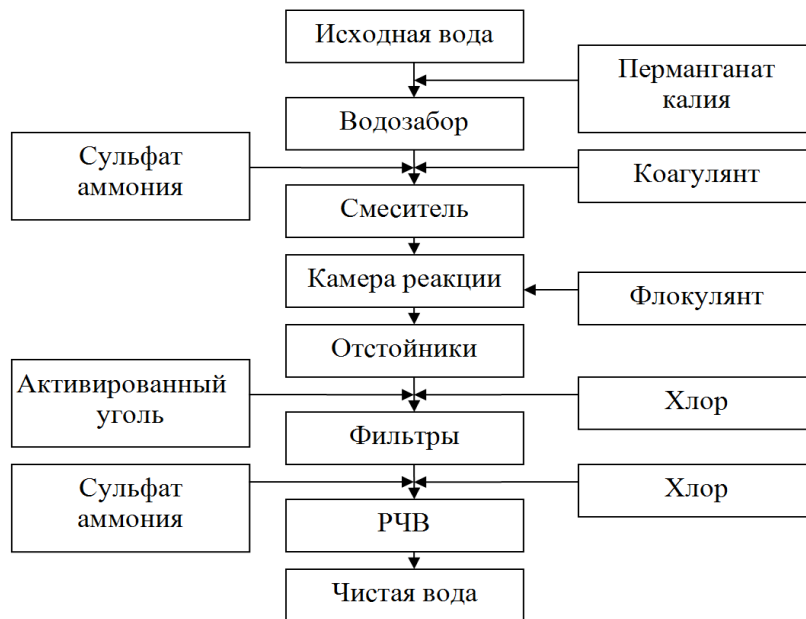


Рисунок 2 – Технологическая схема системы водоочистки на станции «Пруд-Ижевск»

Процессы дезодорации питьевой воды порошкообразным активированным углем (ПАУ) и применение сорбентов являются малоизученными, а именно: отсутствуют рекомендации по выбору марки активированного угля, его оптимального дозирования и выбора времени контакта активированного угля с дезодорируемой водой в зависимости от параметров исходной воды. Большой интерес в данной области представляет разработка математической модели: это позволит сэкономить ресурсы, изучить процессы во времени с возможностью их прогнозирования, а так же выявить общие закономерности (рисунок 3).

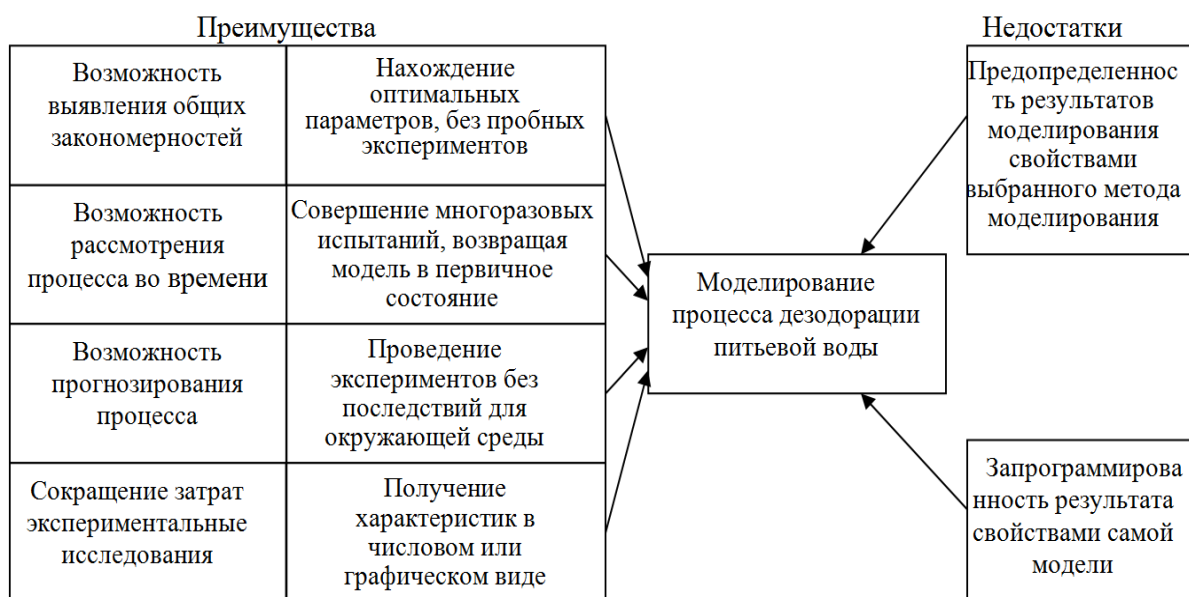


Рисунок 3 – Основные преимущества и недостатки применения моделирования к проблеме дезодорации воды

При этом сформированы условия для разработки модели: показатели исходной воды в системе водоснабжения являются неконтролируемым параметром, показатели питьевой воды - обязательным условием (данное условие формируется согласно перечню СанПиН 2.1.4.1074-01), параметры процесса дезодорации (были рассмотрены основные параметры: дозирование сорбента, его адсорбционная активность и время контакта с водой) являются контролируемыми параметрами, оптимальное значение которых моделируется в зависимости от показателей исходной и питьевой воды (рисунок 4).

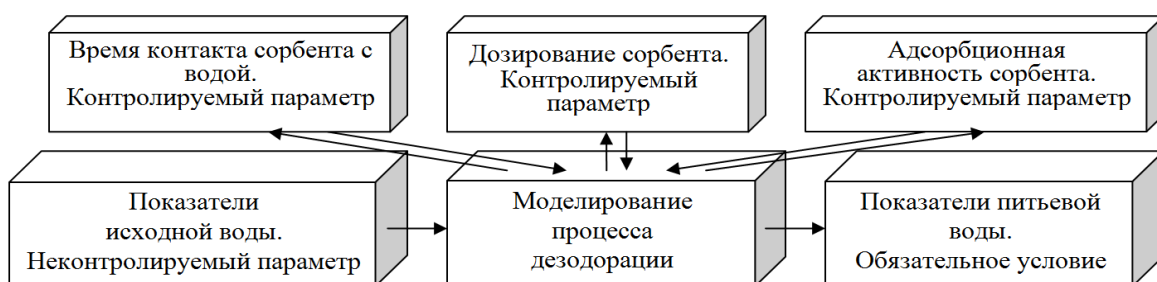


Рисунок 4 – Структурная схема определения условий разработки модели параметров дезодорации питьевой воды в системе питьевого водоснабжения

Исходя из условий для разработки модели параметров дезодорации питьевой воды и учитывая технологическую схему водоподготовки рассматриваемого предприятия была разработана графическая форма системного анализа технологической схемы системы водоочистки в области дезодорации воды (рисунок 5).

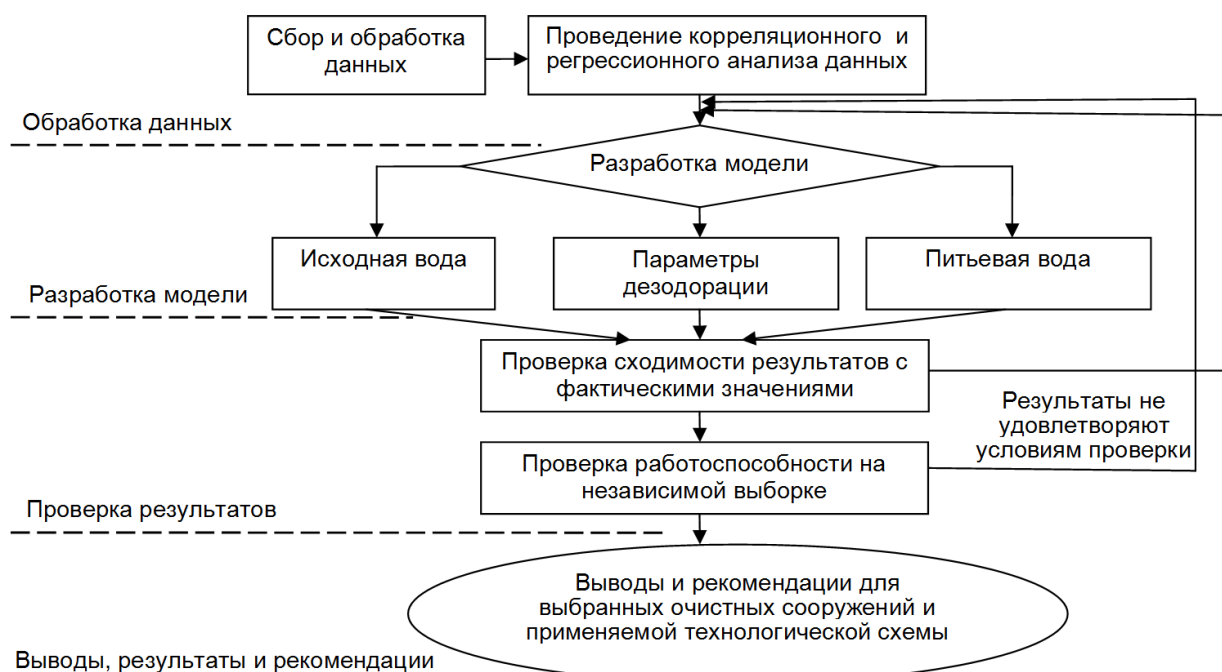


Рисунок 5 – Графическая форма системного анализа технологической схемы системы водоочистки в области дезодорации воды

В разработке модели особый интерес представляет применение искусственной нейронной сети (ИНС): в отличие от линейных методов статистики она позволяет создать нелинейные зависимости и тем самым более точно описывать рассматриваемые процессы. Кроме того, нейронная сеть обучается на всей выборке, не фрагментируя её, что повышает точность результатов.

Во второй главе решается задача выявления факторов, определяющих уровень и динамику процесса дезодорации питьевой воды в системе питьевого водоснабжения. Подобные задачи чаще всего решаются методами корреляционного и регрессионного анализа. Предпосылкой применения корреляционного анализа и регрессионного моделирования стало успешное их применение в способе оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме (патент на изобретение №2559561 RU).

Для оценки эффективности технологической схемы системы водоснабжения в области дезодорации питьевой воды предложен метод на основе корреляционного анализа данных: при коэффициентах корреляции от 0 до 0,5 (отсутствие корреляционной связи) между параметрами исходной и питьевой воды технологическая схема признается эффективной. При коэффициентах более 0,5 и до 1 (наличие корреляционной связи) между параметрами исходной и питьевой воды следует провести более расширенное исследование с использованием регрессионного анализа и моделированием показателей питьевой воды на его основе.

Для реализации поставленной задачи были выбраны основные параметры исходной воды, которые ежемесячно (с 2002 по 2014 год) учитывались на предприятии при дезодорации воды и которые оказывают существенное влияние на ее органолептические свойства. Была сформирована выборка состоящая из 62 точек, каждому из параметров присвоены значения X :

- X_1 – запах в исходной воде, баллы;
- X_2 - температура исходной воды, $^{\circ}\text{C}$;
- X_3 – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$;
- X_4 - фенольный индекс;
- X_5 – концентрация хлоридов, мг/л;
- X_6 - биологическое потребление кислорода, мг/л;
- X_7 – концентрация сине-зеленых водорослей, тыс.кл/мл;
- X_8 – мутность исходной воды, мг/л;
- X_9 – цветность исходной воды, градусы.

Для выявления зависимости между входными параметрами (в данном случае – параметры исходной воды (X)) был проведен корреляционный анализ, составлена матрица корреляций (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты корреляционного анализа данных для входных параметров (X)

Параметры	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
X ₁	1,00	0,44	0,32	0,01	-0,14	0,51	0,43	0,49	0,36
X ₂	0,44	1,00	0,94	0,00	-0,06	0,18	0,00	0,19	0,14
X ₃	0,32	0,94	1,00	-0,06	-0,10	0,07	-0,10	0,11	0,09
X ₄	0,01	0,00	-0,06	1,00	-0,17	-0,15	0,11	0,03	0,22
X ₅	-0,14	-0,06	-0,10	-0,17	1,00	-0,05	-0,38	-0,37	-0,49
X ₆	0,51	0,18	0,07	-0,15	-0,05	1,00	0,48	0,45	0,15
X ₇	0,43	0,00	-0,10	0,11	-0,38	0,48	1,00	0,70	0,53
X ₈	0,49	0,19	0,11	0,03	-0,37	0,45	0,70	1,00	0,49
X ₉	0,36	0,14	0,09	0,22	-0,49	0,15	0,53	0,49	1,00

Для устранения мультиколлинеарности между параметрами X был применен метод главных компонент (МГК). Реализация метода производилась в программном пакете надстроек *RealStatistics*. В результате были выделены три главные компоненты, формирующие 72,79% данных (P_1 – 36,3%, P_2 – 21,82%, P_3 – 14,98%). Далее был проведен корреляционный анализ данных для трех главных компонент (P) и параметров питьевой воды (Z). Корреляционная связь была установлена для концентрации геосмина в питьевой воде, мг/дм³ (Z_1); концентрации хлороформа, мг/дм³ (Z_2); концентрации хлоридов, мг/дм³ (Z_3). Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты корреляционного анализа для трех главных компонент и параметров питьевой воды

Параметры	P_1	P_2	P_3	Z_1	Z_2	Z_3
P_1	1,00	-0,05	-0,47	-0,06	-0,48	0,51
P_2	-0,05	1,00	-0,13	0,62	0,12	0,16
P_3	-0,47	-0,13	1,00	-0,22	0,05	-0,97
Z_1	-0,06	0,62	-0,22	1,00	0,09	0,24
Z_2	-0,48	0,12	0,05	0,09	1,00	0,02
Z_3	0,51	0,16	-0,97	0,24	0,02	1,00

Концентрация геосмина (Z_1) имеет корреляционную зависимость со второй главной компонентой (P_2) (коэффициент корреляции 0,6), их взаимосвязь была определена уравнением (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2015619352 RU):

$$Z_1 = 6^{-6} * e^{0,1244 * P_2} \quad (1)$$

Концентрация хлороформа (Z_2) имеет корреляционную зависимость с первой главной компонентой (P_1) (коэффициент корреляции -0,6), было разработано уравнение (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2015661548 RU):

$$Z_2 = -0,0163 * Ln(P_1) + 0,1086 \quad (2)$$

Для концентрации хлоридов (Z_3) выявлена корреляционная зависимость с первой (P_1) и третьей (P_3) главными компонентами (коэффициенты корреляции 0,5 и -0,9), было разработано уравнение регрессии (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2015661214 RU):

$$Z_3 = 6,1487 + 0,0013 * P_1 - 3,4159 * P_3 \quad (3)$$

где: Z_1 - концентрация геосмина в питьевой воде; Z_2 - концентрации хлороформа в чистой воде; Z_3 - концентрации хлоридов в чистой воде; P_{1-3} - главные компоненты.

Сравнение полученных результатов с фактическими значениями представлены на рисунках 6-8. Нормы (согласно СанПиН 2.1.4.1074-01) для питьевой воды составляют: для хлоридов 350 мг/дм³ (в то время как максимальное смоделированное значение 21,010 мг/дм³), для хлороформа 0,2 мг/дм³ (максимальное смоделированное значение 0,079 мг/дм³), для геосмина нормативные значения не установлены.

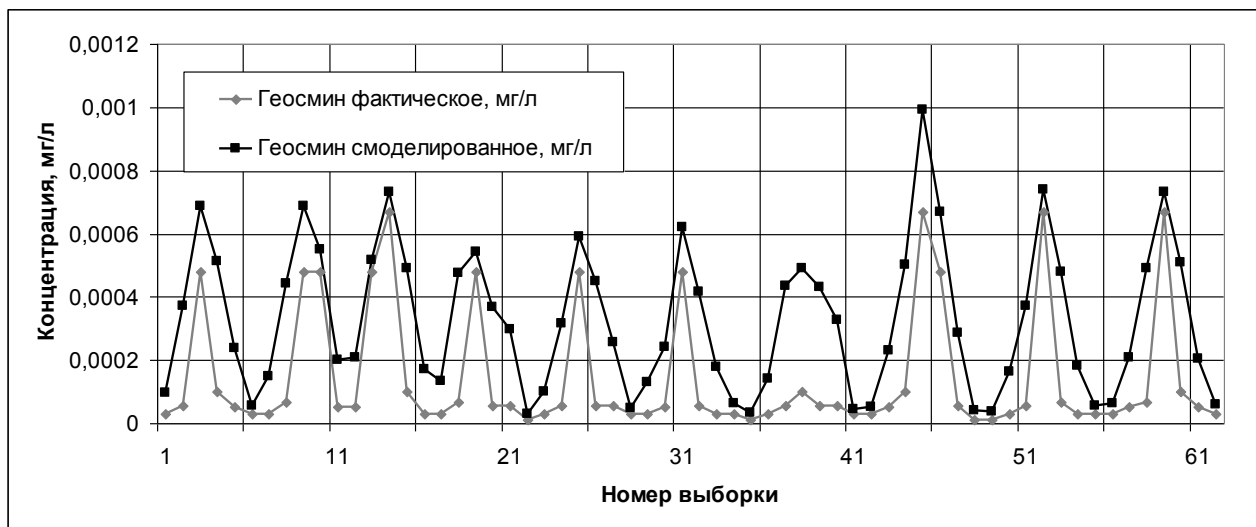


Рисунок 6 – Фактические и смоделированные значения для геосмина

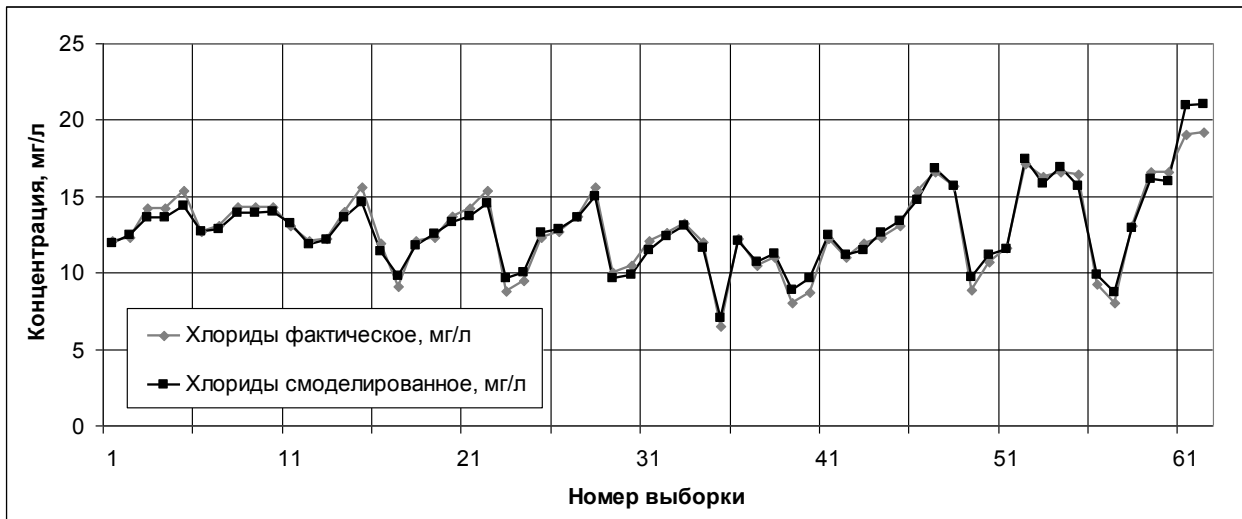


Рисунок 7 – Фактические и смоделированные значения для хлоридов

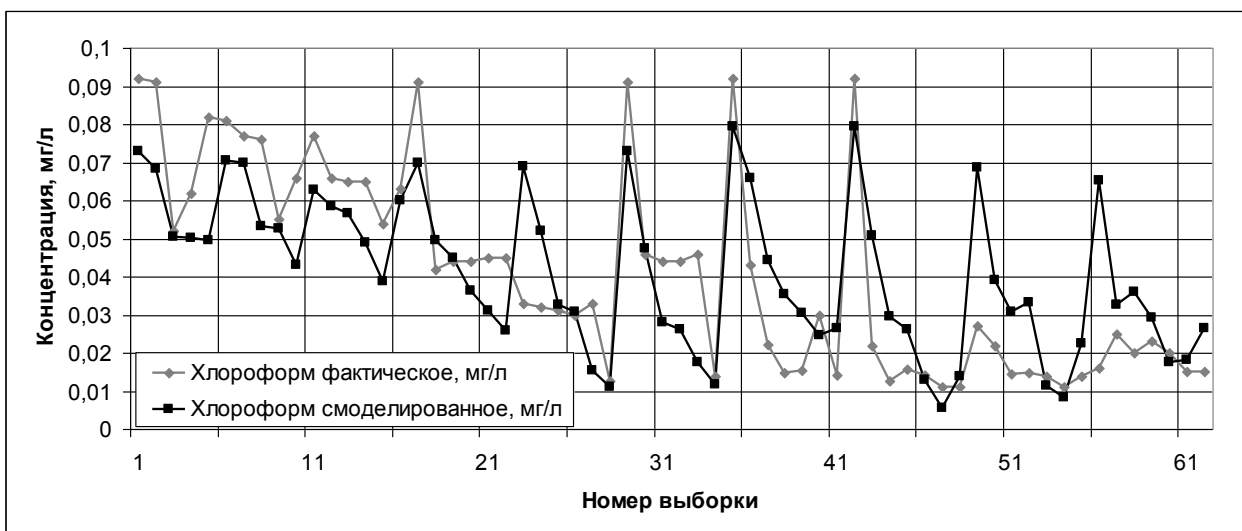


Рисунок 8 – Фактические и смоделированные значения для хлороформа в питьевой воде

Достоверность результатов и работоспособность модели была доказана при помощи коэффициента корреляции (для геосмина – 0,81, хлоридов – 0,97, хлороформа – 0,76), а так же двухвыборочного t-теста с различными дисперсиями: коэффициент Стьюдента во всех трех случаях меньше значения t-критического двухстороннего (для геосмина $0,01 < 1,98$; для хлоридов $0,02 < 1,97$; для хлороформа $0,05 < 1,98$).

Таким образом, при помощи корреляционного анализа доказана высокая эффективность работы предприятия по очистке питьевой воды от одорирующих веществ: корреляционная связь между параметрами исходной и питьевой воды в 86,97 % случаев отсутствует (коэффициенты корреляции находятся в пределах от 0 до 0,5), для остальных 13,04% параметров питьевой воды где имеется корреляционная связь (коэффициенты корреляции в пределах более 0,5 до 1 составили для концентрации геосмина, хлороформа и хлоридов)

разработаны модели на основе регрессионного анализа, однако полученные результаты удовлетворяют установленным нормам для питьевой воды (СанПиН 2.1.4.1074-01).

Для содержания геосмина в питьевой воде была разработана зависимость расхода активированного угля при верхнем пределе концентрации вещества ($0,1 \cdot 10^{-6}$ мг/л) и при нижнем пределе ($0,2 \cdot 10^{-6}$ мг/л). Из полученных результатов можно сказать, что разработку модели следует производить для совокупности параметров дезодорации (выбор оптимальной адсорбционной активности, времени контакта, дозы с учетом оседания частиц и т.д.), а не только для расхода адсорбента. Поэтому представляется актуальным разработка модели для определения совокупности параметров адсорбента (дозировка, адсорбционная активность, рассчитанная из соотношения марок угля, а так же время контакта с очищаемой водой) при процессе дезодорации на основе ряда основных показателей исходной воды. Причем нормативы для показателей питьевой воды следует рассматривать как обязательное условие при разработке данной модели.

В третьей главе рассмотрена возможность и доказана актуальность применения ИНС, корреляционного и регрессионного анализа данных для моделирования основных параметров процесса дезодорации в системе питьевого водоснабжения. В качестве входных параметров были выбраны параметры исходной воды (X) из корреляционного анализа данных. В качестве выходного параметра были выбраны основные параметры дезодорации питьевой воды (Y):

Y_1 – Дозирование сорбента, мг/дм³;

Y_2 – Адсорбционная активность сорбента, мг/г;

Y_3 – Время контакта сорбента с дезодорируемой водой, минуты.

Параметры питьевой воды (Z) были приняты как обязательное условие, основу которого составляет СанПиН 2.1.4.1074-01.

Далее для каждого из выходных параметров (дозирование сорбента, адсорбционная активность, время контакта) была определена значимость входных параметров (в данном случае параметров исходной воды). Результаты определения значимости входных параметров представлены на рисунках 9-11.

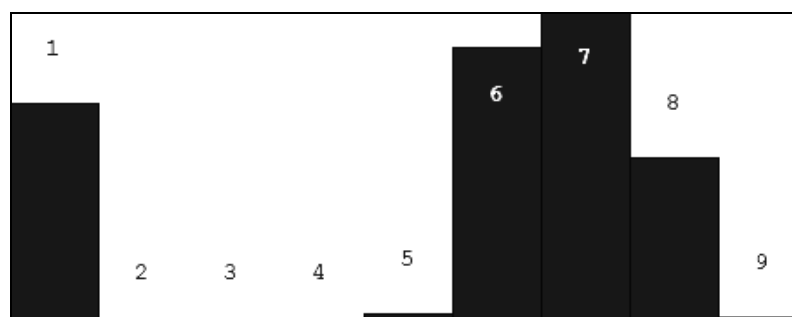


Рисунок 9 – Определение значимости входных параметров для дозирования активированного угля

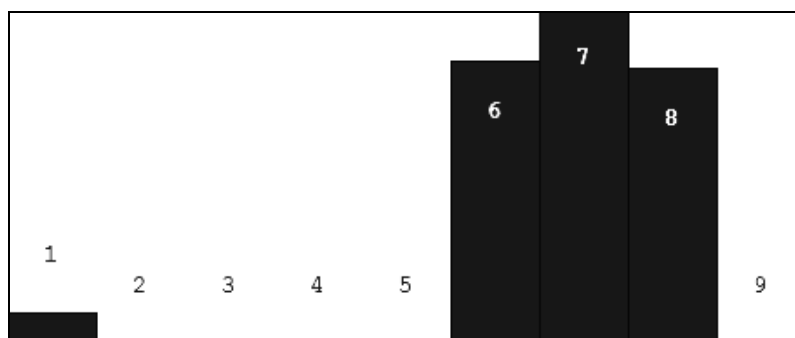


Рисунок 10 – Определение значимости входных параметров для адсорбционной активности активированного угля



Рисунок 11 – Определение значимости входных параметров для времени контакта активированного угля с водой

Номера при определении значимости входных параметров присваивались в соответствии с значениями (X) параметров исходной воды из корреляционного анализа данных:

1. Запах в прудовой воде (X_1), баллы
2. Температура воды (X_2), градусы
3. Температура окружающей среды (X_3), градусы
4. Фенольный индекс (X_4)
5. Концентрация хлоридов (X_5), мг/дм³
6. Биологическое потребление кислорода (X_6), мг/дм³
7. Концентрация сине-зеленых водорослей (X_7), тыс.кл/мл
8. Мутность исходной воды (X_8), мг/л
9. Цветность исходной воды (X_9), градусы

При этом были определены значения параметров нормализации (таблица 3). Чем больше отношение среднего значения параметра нормализации и дисперсии отличается от 1, тем лучше предсказательная сила соответствующей модели. Для улучшения предсказательной силы модели были отброшены наименее значимые входные параметры (таблица 3).

Таблица 3 – Параметры нормализации при определении значимости входов

Значения параметров нормализации при определении значимости входов			
Значения параметров нормализации	Дозировка угля	Адсорбционная активность	Время контакта
Среднее значение параметра нормализации	0,289	0,404	0,382
Дисперсия	0,113	0,113	0,113
Отношение Среднее/Дисперсия	2,56	3,57	3,38
Значения параметров нормализации после удаления наименее значимых входов			
Значения параметров нормализации	Дозировка угля	Адсорбционная активность	Время контакта
Среднее значение параметра нормализации	0,320	0,548	0,831
Дисперсия	0,113	0,113	0,113
Отношение Среднее/Дисперсия	2,83	4,84	7,35

На основе определения значимости параметров исходной воды для каждого из основных параметров дезодорации воды, была разработана структура ИНС, по которой в дальнейшем проходило обучение (рисунки 12, 13). При разработке структуры ИНС учитывалось, что общее число связей сети (весов) должно быть в несколько раз меньше объема обучающей выборки. В противном случае ИНС «переобучится», т.е. «запомнит» данные, потеряв возможность делать статистически значимые предсказания на новых данных.

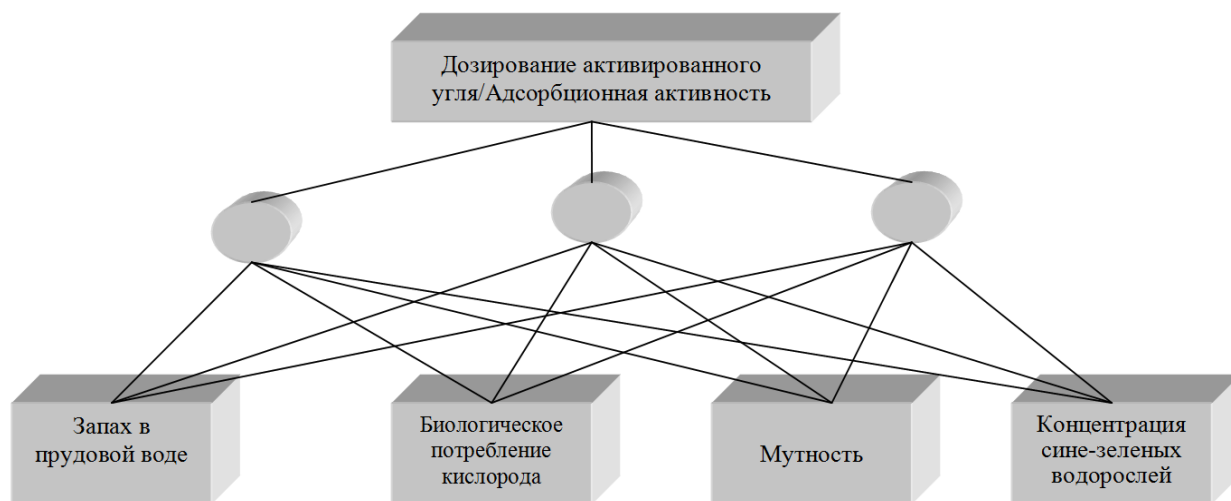


Рисунок 12 – Структура нейронной сети с учетом входных параметров для показателей дозы и адсорбционной активности активированного угля

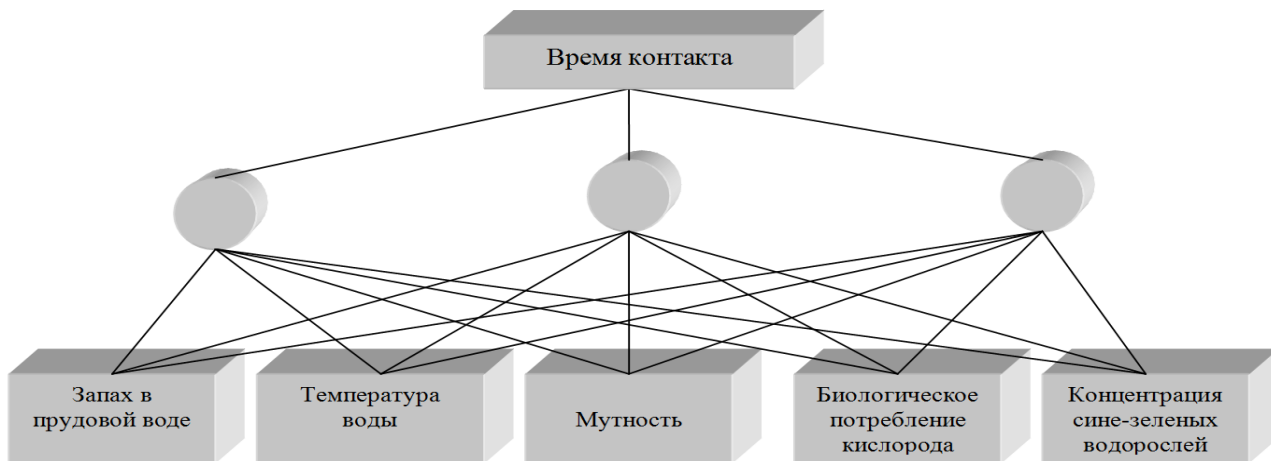


Рисунок 13 – Структура нейронной сети с учетом входных параметров для показателя времени контакта активированного угля с питьевой водой.

В данном случае для моделирования дозирования активированного угля и адсорбционной активности имеется 15 связей, а объем выборки равен 62 (рисунок 12). Таким образом, необходимое условие успешного обучения выполняется (62 больше чем 15 в 4 с лишним раза). Для модели времени контакта имеется 18 связей, а объем выборки равен 62 (рисунок 13), необходимое условие успешного обучения так же выполняется (62 больше чем 18 в 3 с лишним раза).

Процесс обучения ИНС проводился в программном пакете надстроек *Excel Neural Package*. Изначально погрешность ИНС для параметра дозирования активированного угля составляла 0,9. После проведения обучения через 7277 эпох погрешность ИНС (*training error*) сократилась до 0,49. Для адсорбционной активности активированного угля начальная погрешность составляла 1,48. После проведения обучения через 6132 эпох погрешность ИНС составила 0,53. Для времени контакта сорбента с водой начальная погрешность составляла 1,08. После проведения обучения через 6157 эпох погрешность ИНС составила 0,21.

Процесс обучения ИНС по фактическим значениям для параметров дозирования активированного угля, адсорбционной активности и времени контакта сорбента с водой представлены на рисунках 14 - 16.

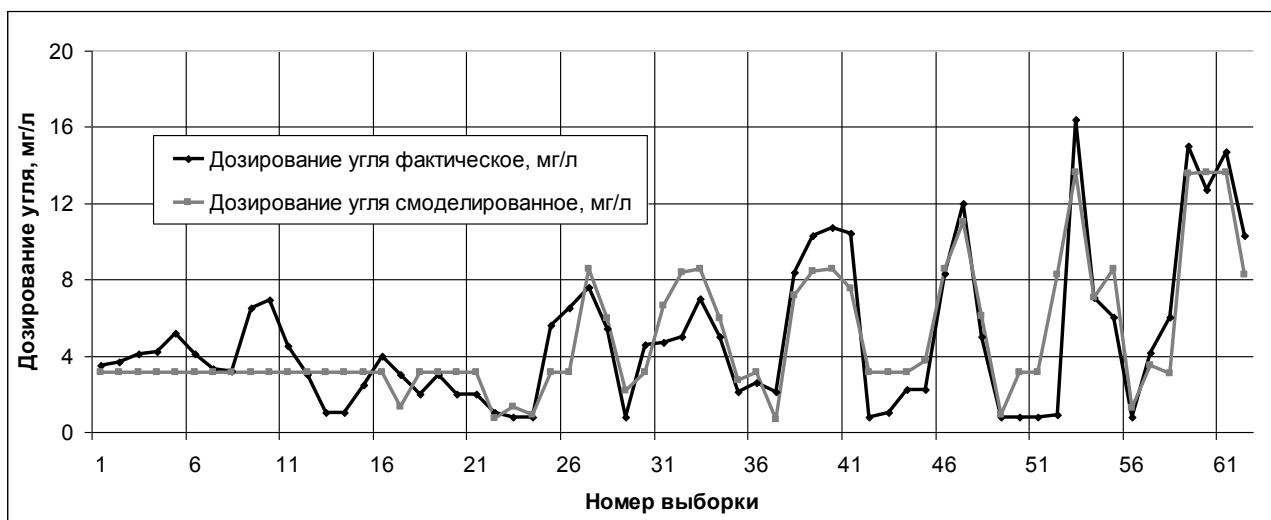


Рисунок 14 – Обучение ИНС по фактическим значениям для параметра дозирование активированного угля



Рисунок 15 – Рисунок 14 – Обучение ИНС по фактическим значениям для параметра адсорбционная активность активированного угля

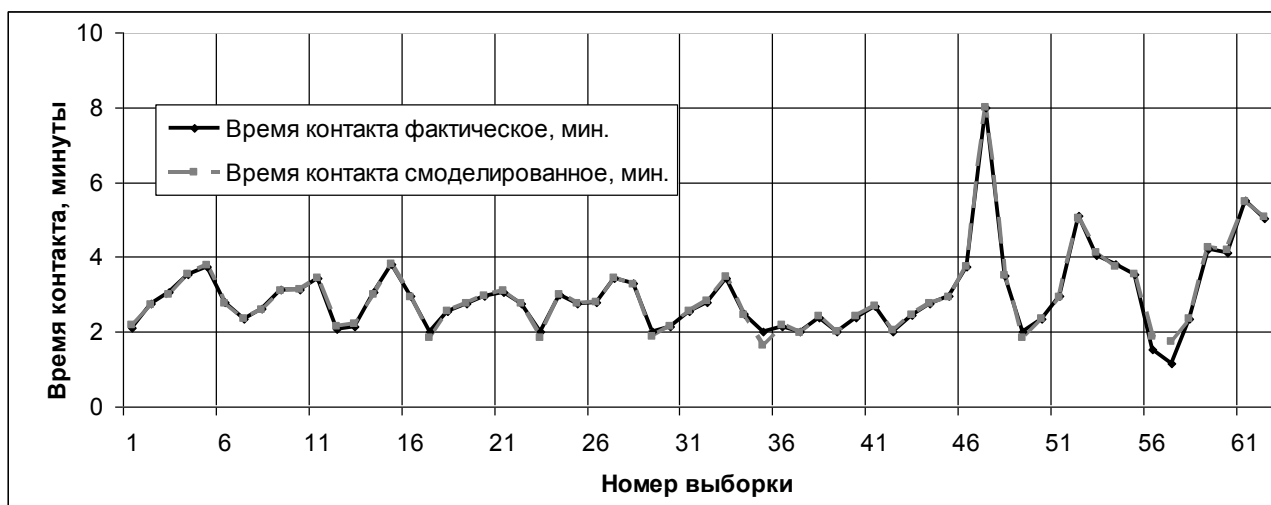


Рисунок 16 – Обучение ИНС по фактическим значениям для параметра время контакта активированного угля с водой

При помощи регрессионного анализа данных обученной нейронной сети было доказано, что полученные результаты хорошо аппроксимируют фактические данные и общая квадратичная ошибка составляет для дозирования активированного угля 0,052%, для адсорбционной активности 0,958%, для времени контакта адсорбента с водой 0,002%. При помощи критерия Фишера было доказано, что разработанная ИНС для очистки воды от неприятных запахов адекватно рассчитывает данные показатели (для дозы активированного угля – 23,22, адсорбционной активности – 81,15, времени контакта с питьевой водой – 43,19).

Применение разработанной модели в качестве инструмента прогнозирования параметров сорбции поможет рассчитать оптимальные параметры процесса дезодорации, а так же сократить остаток сорбента после сезонной очистки.

Анализируя данные по сорбенту на рассматриваемом предприятии с 2003 по 2012 год было установлено, что ежегодная среднесезонная сумма остатка активированного угля составляет 10,282 тонн, в то время как сумма остатка смоделированных значений (в данном случае средняя ошибка регрессии) составляет всего лишь 15 килограмм (таблица 5).

Таблица 5 – Экономическая эффективность от применения разработанной модели на предприятии с 2003 по 2012 год

Остаток сорбента после сезонной очистки на предприятии, тонны	Смоделированный остаток сорбента после сезонной очистки для данного предприятия, тонны	Разница между остатком после сезонной очистки на предприятии и смоделированным остатком, тонны	Экономия средств на закупку сорбента, рубли*
1,02	0,016	1,004	80320
21,035	0,012	21,023	1681840
13,6	0,013	13,587	1086960
11,3	0,013	11,287	902960
7,8	0,01	7,79	623200
3	0,014	2,986	238880
2,9	0,014	2,886	230880
9	0,019	8,981	718480
0,5	0,02	0,48	38400
14,8	0,019	14,781	1182480

*при средней закупочной цене 80 рублей/килограмм

Применение разработанной модели для основных параметров дезодорации позволит сократить ежегодный остаток сорбента после сезонной очистки воды от одорирующих веществ на 99,83 %. При средней закупочной цене активированного угля марок ОУ-А и ОУ-Б в 80 рублей за килограмм, с 2003 по

2012 год возможно было сократить расходы на каждую сезонную закупку сорбента в количестве до 1,5 миллионов рублей.

В четвертой главе проведена проверка работоспособности разработанной модели для основных параметров дезодорации питьевой воды на фактических данных в период с 2013 по 2014 год за каждый месяц когда применялся активированный уголь для очистки воды от неприятного запаха.

При помощи полученных результатов на основе обученной ИНС, была составлена таблица, в которой приведено сравнение фактических и смоделированных значений для параметров адсорбента на 2013-2014 годы (таблица 6).

Таблица 6 – Сравнение фактических и смоделированных на основе обученной нейронной сети данных

№	Фактические значения			Смоделированные значения ИНС		
	Дозирование угля	Адсорбционная активность	Время контакта	Дозирование угля	Адсорбционная активность	Время контакта
1	0,80	180,00	2,00	0,85	180,93	2,00
2	5,50	180,00	2,00	5,30	180,93	1,99
3	9,90	212,71	3,95	9,90	202,88	3,95
4	11,00	225,00	5,25	14,58	225,00	5,25
5	16,00	225,00	6,00	14,58	225,00	6,00
6	16,00	225,00	5,65	14,58	225,00	5,65
7	16,70	212,71	4,65	14,58	212,71	4,64
8	6,00	180,00	3,65	6,00	202,88	3,65
9	0,90	182,80	2,00	0,85	180,93	2,00
10	5,60	215,93	2,90	5,30	202,88	2,89
11	3,93	225,00	3,50	5,30	225,00	3,50
12	8,28	225,00	3,50	8,28	225,00	3,50
13	14,10	225,00	6,00	14,58	225,00	5,99
14	13,70	225,00	5,00	14,58	225,00	5,00
15	6,16	215,93	3,30	5,30	215,93	3,29

На основе разработанных таблиц были составлены графики сравнения фактических и смоделированных значений для параметров дозирования активированного угля, адсорбционной активности, времени контакта сорбента с водой (рисунки 17-19).

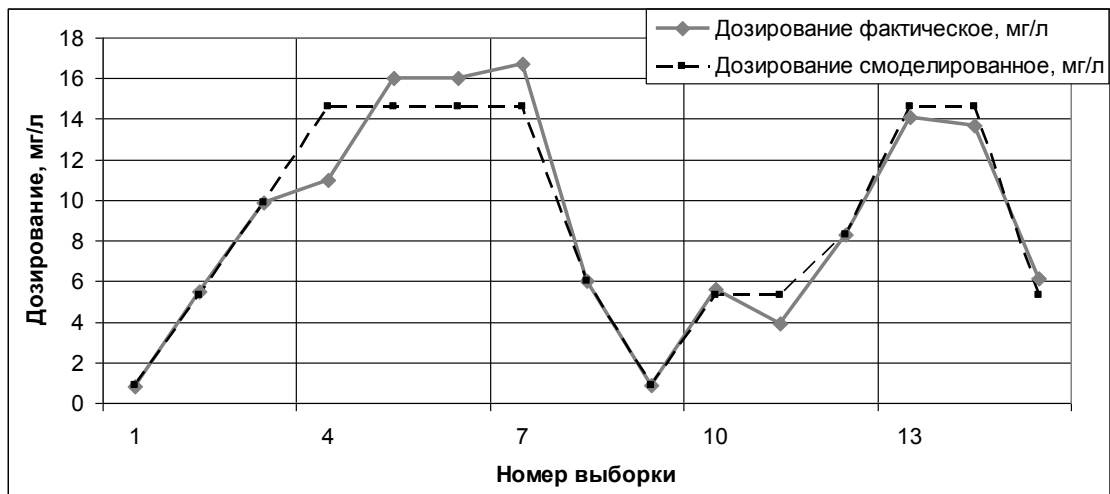


Рисунок 17 – Сравнение результатов моделирования и фактических значений для параметра дозирования активированного угля

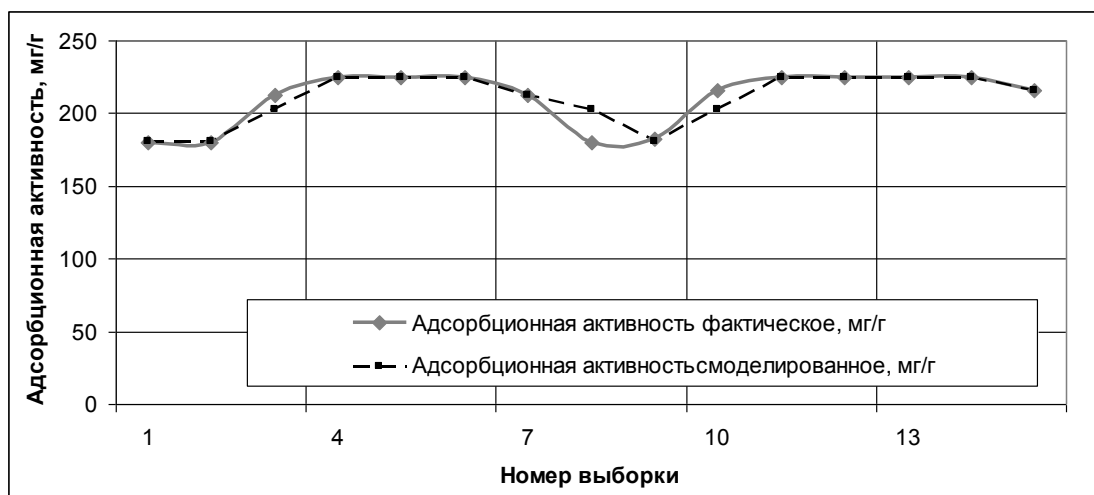


Рисунок 18 – Сравнение результатов моделирования и фактических значений для параметра адсорбционная активность

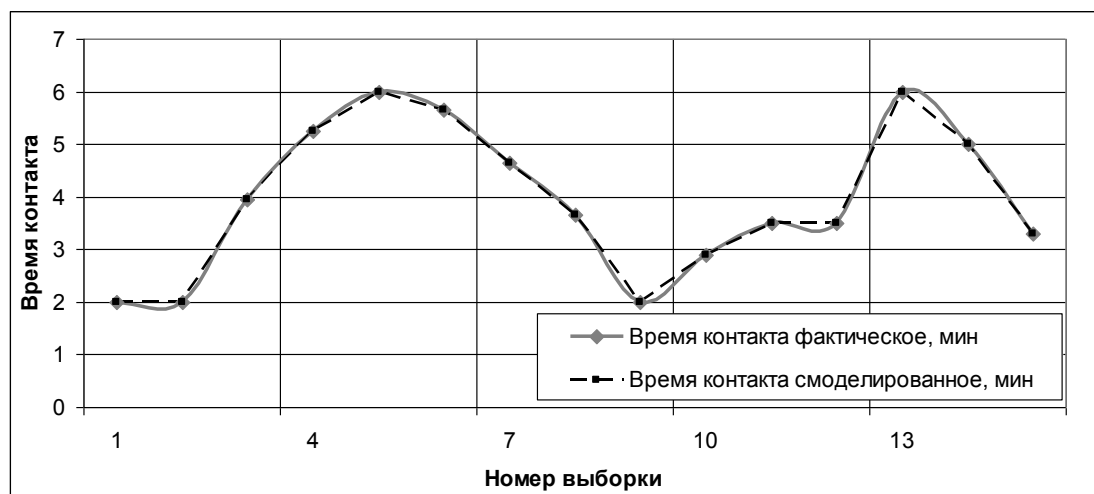


Рисунок 19 – Сравнение результатов моделирования и фактических значений для параметра время контакта сорбента с водой

Смоделированные на основе обученной нейронной сети результаты хорошо аппроксимируют фактические данные: средняя ошибка аппроксимации для дозирования активированного угля составила 9,5%, для адсорбционной активности 1,7%, для времени контакта сорбента с водой – в пределах 1%. Моделирование при помощи уравнений нейрорегрессии дает большую ошибку, что говорит о преимуществе применения обученной ИНС над уравнениями нейрорегрессии в области моделирования значений основных показателей процесса дезодорации.

Возможность применения и актуальность модели доказана на независимой выборке сформированной по данным МУП «Ижводоканал» за 2013-2014 год: остаток сорбента после сезонной очистки воды от одорирующих веществ на предприятии составил 39 тонн, в то время как применение модели позволило бы сократить остаток до 19 килограмм в 2013 и 17 килограмм в 2014 год. Применение разработанной модели позволило бы снизить остаток сорбента на 99,89% (с 9,0 тонн до 19 килограмм марки угля ОУ-В) в 2013 год и на 99,95% (с 30 тонн до 17 килограмм смеси марок ОУ-А и ОУ-В) в 2014 год. При средней закупочной стоимости предприятием активированного угля в 80 рублей за килограмм можно было сэкономить средства в размере 718640 рублей в 2013 году и около 2 миллионов рублей в 2014 году.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Доказана высокая эффективность работы рассмотренных очистных сооружений по удалению одорирующих веществ при помощи корреляционного анализа данных (коэффициенты корреляции для показателей исходной и питьевой воды находятся в интервале от 0 до 0,5, что говорит о слабой связи). Технологическая схема МУП «Ижводоканал» эффективна и в удалении водорослей, которые могут явиться причиной ухудшения органолептических свойств воды: эффективность удаления сине-зеленых водорослей составила 97,51 % (с 2003 по 2014 год).

Применение разработанной модели для основных параметров дезодорации позволит сократить ежегодный остаток сорбента после сезонной очистки воды от одорирующих веществ на 99,83 %.

Работоспособность модели и возможность ее применения была доказана на независимой выборке сформированной по данным МУП «Ижводоканал» за 2013-2014 год: ежегодный остаток сорбента после сезонной очистки воды от одорирующих веществ при помощи разработанной модели можно было снизить на 99,89% (с 9,0 тонн до 19 килограмм марки угля ОУ-В) в 2013 год и на 99,95% (с 30 тонн до 17 килограмм смеси марок ОУ-А и ОУ-В) в 2014 год. При средней закупочной стоимости предприятием активированного угля в 80 рублей за килограмм можно было сэкономить средства в размере 718640 рублей в 2013 году и около 2 миллионов рублей в 2014.

Достоверность полученных результатов была доказана при помощи критерия Фишера (при доверительной вероятности 0,95 составил: для дозы активированного угля – 23,22, адсорбционной активности – 81,15, времени контакта с питьевой водой – 43,19; (при табличных значениях 2,53, 2,53 и 2,54 соответственно)) и коэффициентов корреляции (для дозы активированного угля 0,71, для адсорбционной активности 0,75, для времени контакта 0,92), а так же проведением математической описательной статистики и двухвыборочного t-теста с различными дисперсиями.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

а) статьи опубликованные в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК:

1. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Регрессионное моделирование концентрации геосмина в питьевой воде на основании данных МУП «Ижводоканал» // Интеллектуальные системы в производстве, Ижевск, 2015. - №2(26) – С. 107-108.

2. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Математическая модель определения концентрации геосмина в питьевой воде // Вестник ИЖГТУ имени М.Т.Калашникова, Ижевск, 2016. - №1(69) – С. 59-60.

3. Пономарёв Д.С. Нейрорегрессионная модель дезодорации воды на основе многослойного персептрона // Вестник КГТУ имени А.Н.Туполева, Казань, 2015. - №1 – С. 61-62.

б) патенты на изобретения, патенты (свидетельства) на полезную модель, патенты на промышленный образец, патенты на селекционные достижения, свидетельства на программу для электронных вычислительных машин, базу данных, топологию интегральных микросхем:

4. Способ оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме. А.с. 2559561 RU, А01К61/00 / Пономарев Д.С., Исаков В.Г. Пономарев С.Б., Гаврилов С.А – Опубл.: 14.07.2015.

5. Пономарев Д.С., Исаков В.Г., Пономарева А.С., Программа для оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в пресноводном водоеме. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2014662091. Дата регистрации 24.11.2014.

6. Пономарев Д.С., Исаков В.Г., Пономарева А.С. Расчет расхода активированного угля марки ОУ-В для очистки воды от геосмина. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015619352. Дата регистрации 01.09.2015.

7. Пономарев Д.С., Исаков В.Г. Регрессионное моделирование концентрации хлоридов в питьевой воде на основе данных МУП «Ижводоканал». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015661214. Дата регистрации 21.10.2015.

8. Пономарев Д.С., Исаков В.Г. Регрессионное моделирование концентрации хлороформа в питьевой воде на основе данных МУП «Ижводоканал». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2015661548. Дата регистрации 29.10.2015.

в) публикации за рубежом:

9. Пономарёв Д.С. Improve efficiency odor removal processing of natural waters // Сборник материалов конференции V "Science, Technology and Higher Education" Канада, Вествуд, С. 28-30.

10. Пономарёв Д.С. Improve efficiency of deodorization methods in processing of drinking waters // Международная научная конференция “Наука и образование в Австралии, Америке и Евразии: фундаментальные и прикладные науки” Австралия, С. 183-184.

д) опубликованные в других научных изданиях:

11. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Повышение эффективности методов удаления запахов при обработке природных вод // МГТУ им. Н.Э. Баумана, в 2-х томах (2й том), Москва, 2014. С. 121-124.
12. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Анализ и пути решения проблемы расхода адсорбента при очистке питьевой воды города Ижевска от геосмина // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения. Сборник трудов. Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск, 2015. Том 1. С. 43-47.
13. Пономарёв Д.С. Анализ и пути решения проблемы запаха питьевой воды города Ижевска // Экология и природопользование: прикладные аспекты. 5 Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Башкирский Государственный Педагогический Университет имени М. Акмуллы. Уфа, 2015 год. С. 203-206.
14. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Причины возникновения запаха в поверхностных водах Ижевского пруда и перспективные методы их решения // СГАУ, «Техногенная и природная безопасность», Вторая Всероссийская научно-практическая конференция, Саратов, 2013. С. 220-223.
15. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Анализ технологии обезвоживания осадков сточных вод // ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, «Моделирование в экологии и медицине», Ижевск, 2011. С. 41-45
16. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Сравнительный анализ технологии обезвоживания осадков сточных вод // ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в 21 веке», том 3, Ижевск, 2011. С. 266-273.
17. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Comparative Analysis of Technology of Sewage Deposits Dehydration // ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, EQ-2012 third forum of young researchers, Ижевск, 2012. С. 374-381.
18. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Повышение эффективности методов удаления запахов при обработке природных вод // ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке», II научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых, Ижевск, 2013. С. 266-273.
19. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Изучение проблем экологического состояния ижевского пруда и пути их решения // НОУ ВПО «Камский институт гуманитарных и инженерных технологий», – III Региональная научно-практическая экологическая конференция преподавателей и студентов, Ижевск, 2013. С. 295-301.
20. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Increasing the efficiency of odor removal in processing of natural waters // ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, EQ-2014 forum of young researchers, Ижевск, 2014. С. 138-140.
21. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Оптимизация расхода адсорбента при очистке природных вод от геосмина (на основании данных МУП «Ижводоканал») // ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. Сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 2015. С. 620-623.