

РОССИЙСКИЙ ОТКРЫТЫЙ МОЛОДЕЖНЫЙ ВОДНЫЙ КОНКУРС

«Очистка сточных вод текстильных производств в
диэлектрическом барьерном разряде»

Выполнила:

Ученица 11 «Б» класса
Гусева Дарья Дмитриевна
МБОУ «Лицей № 67» г. Иваново
«Проектная школа химтех»

Руководитель:

Гусев Григорий Игоревич,
Ст. преп. кафедры промышленной экологии
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
химико-технологический университет»

Иваново – 2024 г.

Аннотация

Работа посвящена исследованию очистки водных растворов, содержащих родамин Б, с использованием реактора барьерного разряда. Процесс разложения родамина Б протекает первоначально с образованием промежуточных органических соединений с меньшей молекулярной массой (таких как спирты и карбоновые кислоты), которые в дальнейшем окисляются до диоксида углерода и воды, что подтверждается высокой степенью минерализации. Обработка в плазме барьерного разряда реального стока текстильного предприятия приводит к очистке воды по основным показателям качества воды. Таким образом, плазменные процессы могут быть эффективны для водоочистки и водоподготовки.

Объект исследования – водные растворы родамина Б и реальный необработанный сток текстильного предприятия.

Предмет исследования – диэлектрический барьерный разряд – как метод очистки воды от загрязнителей текстильных производств.

Целью исследования является выявление закономерностей деструкции красителя родамина Б в плазме диэлектрического барьерного разряда, а также обработка при оптимальных параметрах реального стока предприятия.

Задачи исследования:

1. Исследование деструкции родамина Б в плазме диэлектрического барьерного разряда, оптимизация параметров обработки.
2. Изучение кинетики образования продуктов деструкции родамина Б и определение их качественного состава и установление оптимального времени контакта раствора с разрядной зоной при обработке водных растворов, содержащих родамин Б.
3. Обработка реального стока текстильного предприятия.

Работа содержит 4 таблицы, 8 рисунков, 15 литературных источников и изложена на 20 страницах.

Содержание

Введение.....	3
1. Литературный обзор.....	3
1.1. Загрязнение сточных вод органическими красителями	3
1.2. Очистка сточных вод с использованием диэлектрического барьерного разряда	4
2. Материалы и методы.....	5
Очистка стока предприятия в ДБР.....	10
Выводы	11
Список литературы.....	12

Введение

Реальную угрозу загрязнения поверхностных вод создают опасные в экологическом отношении производства: атомная энергетика, химическая промышленность, теплоэнергетика, сельскохозяйственные площади [1]. Поверхностные воды России в наибольшей степени загрязнены нефтепродуктами, фенолами, легко окисляемыми органическими веществами, соединениями металлов, аммонийным и нитритным азотом, а также специфическими загрязняющими веществами [2]. Использование синтетических органических красителей в современных текстильных технологиях [3] приводит к интенсивному загрязнению гидросферы. Поэтому, удаление красителей из сточных вод становится основной экологической проблемой текстильной промышленности. Однако из-за разнообразия органических соединений, используемых в качестве красителей, нет универсальных химических методов удаления красителя из сточных вод [3]. Практически все красители являются токсичными загрязняющими веществам из-за их устойчивости к процессам разложения, что приводит к их накоплению в водных объектах и почве. В процессе их трансформации в окружающей среде они способны образовывать более токсичные соединения, обладающие канцерогенными и мутагенными свойствами, негативно воздействуя на живые организмы. Методология данной работы строится на использовании плазмохимических систем, реализующих диэлектрический барьерный разряд в среде кислорода, используемого в качестве плазмообразующего газа для водоочистки от красителей текстильных производств. Для решения поставленных задач в работе были использованы современные физико-химические методы исследований.

1. Литературный обзор

1.1. Загрязнение сточных вод органическими красителями

Сточные воды текстильной промышленности имеют весьма сложный состав и высоко токсичны, они представляют собой серьезную экологическую опасность. Очистка сточных вод хлопкоперерабатывающих предприятий — это многостадийный процесс, требующий правильной поэтапной очистки, поскольку побочные продукты могут быть токсичными. Текстильные стоки требуют применения комплексного сочетания методов очистки способствующих более полному удалению ПАВ, неорганических и органических веществ, красителей, взвешенных веществ и солей [4-7].

Сточные воды текстильного производства в качестве основных загрязнителей содержат: красители, соединения тяжелых металлов, вредные органические соединения и др. Поэтому очистка сточных вод красильных производств, с целью предотвращения

загрязнения водоемов, представляет собой важную экологическую задачу. В связи с высоким содержанием солей в красильных растворах, использование традиционных биологических методов очистки не представляется возможным. До 20% синтетических органических красителей, производимых в мире, теряются в процессе окраски волокон и тканей [4,6]. При этом разложение органических красителей под действием природных факторов (солнечная радиация, температурные воздействия) часто сопровождается образованием 109 токсичных соединений, опасных для здоровья людей и животных. Проблема усугубляется также и тем, что под действием анаэробных бактерий азокрасители преобразуются в потенциально опасные для здоровья ароматические амины [8]. Показано, что красители при концентрации более 0,1 мг/дм³ влияют на кислородный режим воды, ХПК, БПК₅ и особенно на процессы аммонификации и нитрификации в воде [9].

1.2. Очистка сточных вод с использованием диэлектрического барьерного разряда

Современные темпы истощения сырьевых и энергетических ресурсов ведут к глобальному внедрению энергосберегающих технологий, создание которых занимает особое место среди приоритетных направлений развития науки и техники. Внимание ученых привлекают методы химии высоких энергий (ХВЭ), в частности плазмохимическая деструкция органических соединений, с использованием газоразрядной плазмы. Важная особенность плазмы заключается в том, что заряженные частицы плазмы участвуют как в индивидуальных, так и в коллективных взаимодействиях [10-12].

Наиболее распространенным в лабораторной и технической практике способом генерации состояния плазмы является газовый разряд – прохождение тока через среду под действием высокого внешнего напряжения. Для обработки водных растворов используют исключительно разряды атмосферного давления. Зона разряда (плазмы) непосредственно контактирует с обрабатываемым раствором. Первичным процессом, определяющим существование плазмы, является ионизация молекул или атомов плазмообразующего газа ударами электронов, ускоренных под действием внешнего электрического поля [13]. Гибель заряженных частиц происходит как путем их диффузии к границам разрядной зоны (раствор), так и при совместной рекомбинации электронов и положительных ионов в объеме плазмы [14].

Диэлектрический барьерный разряд (ДБР) реализуется между двумя близко расположенными электродами с условием что, хотя бы один из них покрыт диэлектриком, являющимся барьером для постоянного тока. Его преимуществом

являются высокие скорости разложения загрязняющих веществ на менее токсичные продукты [5-6], благодаря образованию большого количества кислород-содержащих активных частиц в плазме кислорода ($O_2(a^1\Delta_g)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, $O_2(A^3\Sigma_u^+)$, $O(^3P)$, $O(^1D)$, O_3 , O^- , O_2^- , O_2^+ , O^+ и др.), способных участвовать в окислительных процессах.

Выбор в качестве модельного красителя Родамина Б обусловлен двумя причинами. С одной стороны, он относится к представителям группы флуоресцентных красителей, хорошо растворим в воде, и имеет высокую стабильность к действию света. С другой стороны, Родамин Б нашел широкое применение в текстильной и пищевой промышленности [15], в лазерной технологии [15], а также в качестве биомаркера и молекулярного зонда [15, 16], электрохимического люминесцентного сенсбилизатора [17], а также сенсбилизатора в сочетании с оксидами металлов в солнечных батареях [18]. При этом, Родамин Б – токсичное соединение, оказывающее раздражающее действие на слизистые оболочки и кожу. Он обладает канцерогенными свойствами, проявляет нейротоксическое действие и оказывает хроническое токсическое действие на водные организмы и человека [18].

2. Материалы и методы

В качестве модельного загрязняющего вещества использовался водный растворы содержащий краситель Родамин Б (RhB , $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$, $M = 479,02$ г/моль). Модельный раствор красителя готовится смешиванием навески Родамина Б с дистиллированной водой. Начальная концентрация красителя варьировалась в диапазоне – 10 – 40 мг/л.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, основным элементом которой являлся реактор диэлектрического барьерного разряда (рис. 2). Среднеквадратичное значение напряжения в экспериментах составляло 16,5 кВ (рис. 3). При этом ток разряда составлял 13,08 мА. Частота напряжения, приложенного к электродам, составляла 800 Гц.

Объемная мощность, вкладываемая в разряд (P , Вт/см³), составляла 8.63 Вт/см³ и рассчитывалась по формуле:

$$W = \frac{U \cdot I}{V_p}, \quad (1)$$

где I , А – сила тока во вторичной цепи, U , В – напряжение, V_p , см³ – объем разрядной зоны, рассчитанный по формуле:

$$V_p = S_{сеч.} \cdot L_{p.з.}, \quad (2)$$

где $S_{сеч.}$, см² – площадь сечения разрядной зоны, $L_{p.з.}$, см – длина разрядной зоны.

Объем разрядной зоны реактора ДБР с коаксиальным расположением электродов составлял 25 см³. В качестве плазмообразующего газа во всех экспериментах использовался технический кислород, расход которого во всех опытах составлял 500 мл/мин (8,33 мл/с). Контроль значений первичного напряжения осуществлялся вольтметром марки Д 5015. Типичные формы импульсов тока и напряжения разряда приведены на рис. 3.

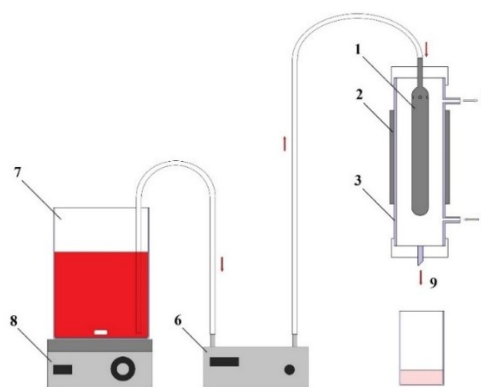


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – внутренний электрод; 2 – внешний электрод; 3 – стеклянная трубка; 4 – вход газа (кислород); 5 – выход газа; 6 – насос; 7 – раствор красителя; 8 – мешалка магнитная; 9 – обработанный раствор.

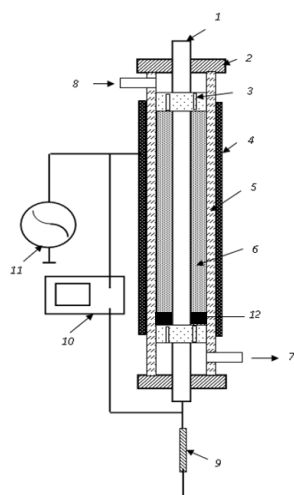


Рис. 2. Реактор с коаксиальным расположением электродов.

1 – внутренний электрод, 2 – тефлоновая вставка, 3 – тефлоновая вставка, 4 – внешний электрод, 5 – стеклянная трубка (диэлектрический барьер), 6 – зона горения плазмы, 7 – выход газа, 8 – вход газа, 9 – резистор 100 Ом, 10 – цифровой двухканальный осциллограф GW Instek GDS-2072, 11 – блок питания, 12 – фторопластовое кольцо.

Толщина слоя жидкости при ламинарном течении в поле силы тяжести может быть рассчитана [19]:

$$\tau = \frac{\pi D \cdot h \cdot L}{Q} \quad (3)$$

Оба сигнала были записаны цифровым двухканальным осциллографом GW Instek GDS-2072 (Instek, Тайвань). Входную мощность определяли путем интегрирования произведения обеих форм сигнала за период.

Время контакта с разрядной зоной реактора τ изменялось в диапазоне приблизительно 0,39 – 5,91 с. Величины τ рассчитывались по формуле (3), где h , см² – толщина слоя жидкости при ламинарном течении в поле силы тяжести; $L = 8$ см – длина зоны разряда, Q , см³/с – скорость потока раствора.

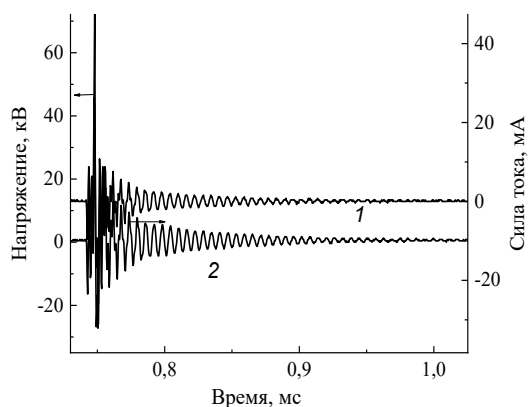


Рис. 3. – Типичные формы импульсов тока и напряжения разряда.

Концентрацию родамина-Б в растворе определяли спектрофотометрическим методом по спектрам поглощения в диапазоне длин волн 200-800 нм, имеющим основную полосу поглощения с максимумами 554 нм, что соответствует переходам $n \rightarrow \pi^*$ групп $C = N$ и $C = O$ [20]. УФ-спектры до и после обработки регистрировали с использованием спектрофотометра Hitachi U-2001.

Величина рН исследуемых растворов в ходе экспериментов до и после обработки определялась с помощью рН-метра «рН-150МИ», основная абсолютная погрешность которого составляла $\pm 0,05$ рН.

Определение степени минерализации исходного соединения проводили по изменению концентрации общего органического углерода после обработки водных растворов фенола в ДБР. Для этого оценивали показатель химического потребления кислорода (ХПК) - количество кислорода в воде, необходимое для полного окисления органических веществ, содержащихся в образце, до CO_2 на флуориметре Флюорат-02М. Погрешность метода составляет $\pm 15\%$ [21].

3. Результаты и обсуждение

Первоначальным этапом исследований являлось определение оптимальных параметров при обработке растворов, содержащих родамин Б, в плазме ДБР. Параметры проведения эксперимента по определению эффективности деструкции родамина Б в плазме ДБР представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры эксперимента

Расход газа, л/мин	0,5
Время контакта, сек (расход жидкости (мл/сек))	3,4 (0,08)
Конц-я родамина, мг/л	40

Как видно из таблицы 2, при увеличении объемной мощности, вкладываемой в разряд, происходит увеличение эффективности деструкции. В качестве оптимальных параметров, были выбраны – частота 800 Гц, Мощность объемная – $8,63 \text{ Вт/см}^3$.

Таблица 2

Зависимость эффективности деструкции родамина в ДБР от параметров обработки

<i>Частота, Гц</i>	<i>Мощность объемная, Вт/см³</i>	<i>α, %</i>
500	6,06	28,5
	7,83	30
	9,09	33,8
	9,72	37,5
800	6,69	45
	8,63	48,5
	10,06	50,5
	10,92	52,5

Оптимальные параметры, использующиеся в дальнейшем в работе, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры эксперимента

Параметр	Значение	Единица измерения
Концентрация красителя (родамин Б)	40	мг/л
Частота	800	Гц
Мощность, вкладываемая в разряд	8,6	Вт/см ³
Сила тока	13	мА
Напряжение	16,5	кВ
Расход плазмообразующего газа (O ₂)	0,5	л/мин
Время контакта	0,39-5,9	с

Предполагая, что родамин-Б в рассматриваемых процессах подвергается деструкции, то изменение концентрации красителя в растворе будет описываться уравнением:

$$C = C_n \cdot \exp(-K \cdot \tau) \quad (8)$$

где: K – эффективный коэффициент скорости (c^{-1}), C – концентрация красителя после обработки в ДБР, C_n – начальная концентрация в растворе, τ_k – время контакта (с).

Оценка энергетической эффективности процесса деструкции родамина-Б ($Y_{50\%}$, г/кВт·ч.) проводилась по уравнению [22]:

$$Y_{50\%} = \frac{C_n \cdot V \cdot \alpha}{P \cdot t \cdot 100}, \quad (9)$$

где C_n – начальная концентрация красителя в растворе, г/л; V – объем обрабатываемого раствора, л; P – мощность, затрачиваемая на процесс деструкции, кВт; t – время обработки, ч.

На рисунке 5 показано изменение UV-Vis спектра поглощения родамина-Б, который, как хромофор, характеризуется тремя основными полосами поглощения в водном растворе - при 554, 340 и 259 нм [23]; уменьшение последней указывает на деградацию ароматической части красителя. Как видно из рисунка 5, наибольшая эффективность деструкции наблюдается при времени контакта 5,9 секунд. Также из рисунка видно резкое возрастание пика в диапазоне длин волн интенсивных полос вблизи 340-370 нм. Эти полосы могут быть характерны для промежуточных продуктов

деструкции [24], что указывает на протекание деструктивных окислительных процессов, приводящих к разрыву ароматических колец красителя и образованию более простых органических соединений. Это также подтверждается исследованием величины pH, после обработки в растворе, которая представлена на рис. 6. Как видно из рисунка, pH незначительно снижается, что говорит об образовании в растворе карбоновых кислот.

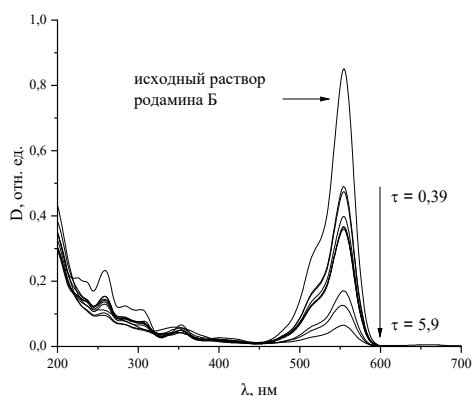


Рис. 5. Изменение UV-Vis спектров в процессе обработки растворов, содержащих родамин-Б, от времени контакта с зоной разряда.

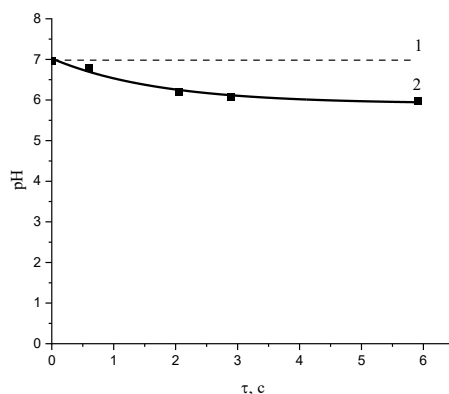


Рис. 6. Изменение pH обработанного раствора от времени контакта с зоной горения плазмы.

Влияние на процесс деструкции времени контакта с зоной горения плазмы и кинетика разложения, а также эффективность деструкции представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

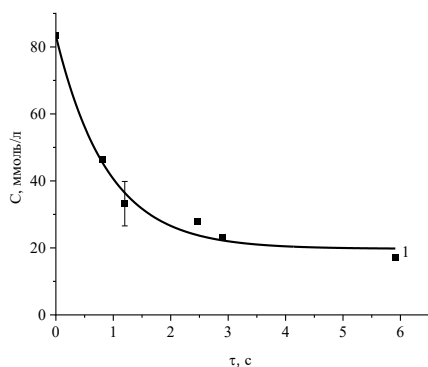


Рис. 7. Снижение концентрации родамин-Б от времени контакта с зоной разряда.

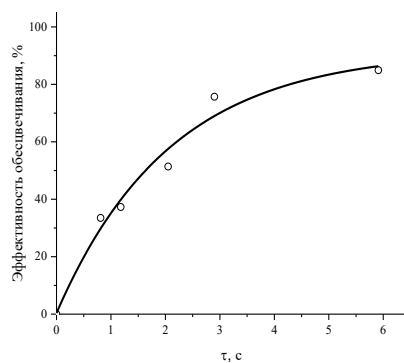


Рис. 8. Эффективность обесцвечивания родамин-Б от времени контакта с зоной разряда.

Константа скорости деструкции составляет $0,33 \pm 0,056$, а эффективность $Y_{50\%}$ процесса разложения родамин-Б - $0,913$ г/кВт·ч. Отметим, что константы скорости процессов разложения родамин-Б существенно больше известных в литературе ($0,8 - 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ [25-27]).

Из данных, представленных в таблице 5, можно сделать вывод, что энергетическая эффективность увеличивается с увеличением степени деструкции родамин-Б, что связано с уменьшением концентрации исходного красителя, а также

приводит к снижению вероятности взаимодействия активных частиц, образующихся в растворе, с молекулами родамина-Б и промежуточными продуктами его разложения.

При максимальной в условиях эксперимента степени разложения (85 %), степень минерализации составляет 80 %. Таким образом, процесс разложения исходного соединения протекает первоначально с образованием промежуточных органических соединений с меньшей молекулярной массой (таких как спирты и карбоновые кислоты), которые в дальнейшем окисляются до CO, CO₂ и H₂O, что подтверждается высокой степенью минерализации.

Проведенные оценки позволяют предложить возможный механизм разложения родамина-Б, который протекает через ряд промежуточных стадий, которые включают разрыв ароматических колец, с образованием альдегидов, спиртов и карбоновых кислот, которые являются легко окисляемыми соединениями и под действием активных частиц переходят в CO и CO₂.

Очистка стока предприятия в ДБР

Поверхностный сток с текстильных предприятий является одним из интенсивных источников загрязнения окружающей среды различными примесями природного и техногенного происхождения. Водным законодательством РФ запрещается сбрасывать в водные объекты неочищенные до установленных нормативов дождевые, талые и поливочные воды, организованно отводимые с селитебных территорий и площадок предприятий [28].

Наиболее полное представление об эколого-экономической эффективности и безопасности (как для человека, так и для окружающей среды) того или иного метода очистки воды можно получить лишь после его испытаний в условиях реальных систем. Изучение характерных особенностей каждого вновь разрабатываемого метода очистки на начальном этапе исследований целесообразно проводить на модельных растворах, имитирующих рассматриваемые системы. При переходе от модельного эксперимента к реальным условиям следует ожидать изменения эффективности окислительных процессов, в первую очередь, по причине появления возможных побочных реакций, обусловленных наличием в реальных сточных водах веществ различной природы.

Для оценки эффективности работы плазмохимического оборудования было проведено исследование по очистке стока с текстильного предприятия. Состав воды представлен в табл. 4.

Таблица 4

Изменение концентраций загрязняющих веществ ливневого стока с селитебной территории при его обработке плазмохимическими методами

Показатель	ПДК _{р.х.} мг/дм ³	До обработки, мг/дм ³	После обработки в ДБР, мг/дм ³
рН	6,5-8,5	11,7	8,12
БПК ₅	3	23	15
ХПК	30	72	51
Сухой остаток	1000	2929	1304
ПАВ ан.	0,5	1,64	0,09

Количество кислорода, израсходованное в определенный промежуток времени в процессе аэробного биохимического окисления органических веществ, содержащихся в исследуемой воде (БПК) до плазмохимической обработки равно 12,5 мг/л, а уже после обработки воды в ДБР БПК в среднем снизилось почти на 35 %. Следует отметить, что несмотря на высокие начальные концентрации (относительно ПДК_{р.х.}) органических соединений (табл. 4), степень разложения большинства из них отстает достаточно высокой. Достаточно высокие степени разложения подтверждают тот факт, что плазмохимические методы можно использовать для очистки воды от высокотоксичных соединений, содержащих в своем составе ароматическую группу. Именно стадия разложения исходных органических примесей играет определяющую роль в формировании общей эффективности (в уменьшении содержания органических соединений) процесса очистки сточных вод.

Выводы

1. Наибольшая эффективность деструкции наблюдается при времени контакта с зоной горения плазмы 5,9 секунд.
2. Константа скорости деструкции составляет $0,33 \pm 0,056$, а эффективность $Y_{50\%}$ процесса разложения родамина-Б - 0,913 г/кВт·ч.
3. При максимальной в условиях эксперимента степени разложения (85 %), степень минерализации составляет 80 %. Таким образом, процесс разложения исходного соединения протекает первоначально с образованием промежуточных органических соединений с меньшей молекулярной массой (таких как спирты и карбоновые кислоты), которые в дальнейшем окисляются до CO, CO₂ и H₂O, что подтверждается высокой степенью минерализации.
4. БПК до плазмохимической обработки равно 12,5 мг/л, а уже после обработки воды в ДБР, БПК в среднем снизилось почти на 35 %. Достаточно высокие степени разложения подтверждают тот факт, что плазмохимические методы можно использовать для очистки воды от высокотоксичных соединений, содержащих в своем составе ароматическую группу при очистке реального стока предприятий.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году»-М.: Минприроды России; НИАПрирода, 2017. – 760 с.
2. Марченко Т. А. и др. Методы оценки качества водоемов по комплексу гидрохимических показателей на примере рек Ивановской области //Вода: химия и экология. – 2015. – №. 11. – С. 22-29.
3. Huang F. et al. Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma //Chemical Engineering Journal. – 2010. – Т. 162. – №. 1. – С. 250-256.
4. Васильев Г.В., Ласков Ю.М., Васильева Е.Г. Водное хозяйство и очистка сточных вод предприятий текстильной и легкой промышленности. – М.: Легкая индустрия, 1996.].
5. Трегубова А.А. Современные экологические проблемы текстильной технологии. Современные наукоемкие технологии / А.А. Трегубова. - М.: Metallurgy, 2007.].
6. Ануфриев В. Н., Очистка сточных вод предприятий текстильной промышленности / В. Н. Ануфриев // Экология на предприятии. –М., 2015. – № 1.с. 94 – 96.].
7. Ксенофонтов Б.С., Проблемы очистки воды / Б. С. Ксенофонтов. - М: Общество "Знание" РСФСР, 1991. С. 32 - 34.].
8. Ливчак И.Ф., Воронов Ю.Ф. Охрана окружающей среды. – М.: Колос, 1995. – 165с.
9. Амонова, М.М. Исследование влияния концентрации коагулянтов и адсорбентов при очистке сточных вод текстильного производства / М.М. Амонова Б.Ф. Мухиддинов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. —2021. — 5(86).
10. Васильев Г.В., Ласков Ю.М., Васильева Е. Г. Водное хозяйство и очистка сточных вод предприятий текстильной промышленности. – М.: Легкая индустрия, 1976. – 224с.
11. Краснобородько И.Г., Губанов Л.Н., Сафин Р.С. Разработка метода электрофлотации для очистки сточных вод красильно-отделочных фабрик от поверхностно-активных веществ. – строительство и архитектура, 1982, N3. – с.56-57.
12. Активный ил в очистке воды [Электронный ресурс]: науч.- популярн. журн. /«Всё о воде» - Электрон. журн. - Бармин: «Всё о воде», 2011.
13. Методы химии высоких энергий в защите окружающей природной среды: учеб. пособие / Мешалкин В.П., Койфман О.И., Гриневич В.И., Рыбкин В.В., - М.: Химия, 2008. - 244 с.
14. Чирков А.Ю., Введение в физику плазмы: Учеб. пособие по курсу "Физика плазмы" / Чирков А.Ю. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. - 50 с.

15. Asano M., Doi M., Baba K., Taniguchi M., Shibano M., Tanaka S., Sakaguchi M., Takaoka M., Hirata M., Yanagihara R. Bio-imaging of hydroxyl radicals in plant cells using the fluorescent molecular probe rhodamine B hydrazide, without any pretreatment // *Journal of bioscience and bioengineering*. – 2014. – Т. 118, № 1. – С. 98-100.
16. Gong Y.-J., Zhang X.-B., Mao G.-J., Su L., Meng H.-M., Tan W., Feng S., Zhang G. A unique approach toward near-infrared fluorescent probes for bioimaging with remarkably enhanced contrast // *Chemical science*. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 2275-2285.
17. Li J., Li S., Wei X., Tao H., Pan H. Molecularly imprinted electrochemical luminescence sensor based on signal amplification for selective determination of trace gibberellin A3 // *Analytical chemistry*. – 2012. – Т. 84, № 22. – С. 9951-9955.
18. Dire D. J., Wilkinson J. A. Acute exposure to rhodamine B // *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*. – 1987. – Т. 25, № 7. – С. 603-607.
19. Gusev G. I., Gushchin A. A., Grinevich V. I., Izvekova T. V., Sharonov A. V., Rybkin V. V. Treatment of Wastewater Containing 2,4-dichlorophenol in Dielectric Barrier Discharge Plasma // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. – 2020. – Т. 63, № 7. – С. 88-94.
20. Chen X., Xue Z., Yao Y., Wang W., Zhu F., Hong C. Oxidation degradation of rhodamine B in aqueous by treatment system // *International Journal of Photoenergy*. – 2012. – Т. 2012.
21. ПНД Ф 14.1:2:4.190-2003. Методика измерения бихроматной окисляемости (химического потребления кислорода) в пробах природных, питьевых и сточных вод фотометрическим методом с использованием анализатора жидкости Флюорат-02. ООО "Люмекс". 2003.
22. Son H.-J., Wang X., Prasittichai C., Jeong N. C., Aaltonen T., Gordon R. G., Hupp J. T. Glass-encapsulated light harvesters: More efficient dye-sensitized solar cells by deposition of self-aligned, conformal, and self-limited silica layers // *Journal of the American Chemical Society*. – 2012. – Т. 134, № 23. – С. 9537-9540.
23. The infrared spectra of complex molecules: Volume two advances in infrared group frequencies. / Bellamy L.: Springer Science & Business Media, 2012.
24. Wang J., Sun Y., Jiang H., Feng J. Removal of caffeine from water by combining dielectric barrier discharge (DBD) plasma with goethite // *Journal of Saudi Chemical Society*. – 2017. – Т. 21, № 5. – С. 545-557.
25. Cuiping B., Xianfeng X., Wenqi G., Dexin F., Mo X., Zhongxue G., Nian X. Removal of rhodamine B by ozone-based advanced oxidation process // *Desalination*. – 2011. – Т. 278, № 1-3. – С. 84-90.

26. Silverstein R. M., Bassler G. C. Spectrometric identification of organic compounds // Journal of Chemical Education. – 1962. – Т. 39, № 11. – С. 546.
27. Jain R., Mathur M., Sikarwar S., Mittal A. Removal of the hazardous dye rhodamine B through photocatalytic and adsorption treatments // Journal of Environmental Management. – 2007. – Т. 85, № 4. – С. 956-964.
28. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки по-верхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. – М.: ФГУП “НИИ ВОДГЕО”. - 2006.