

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»

Кафедра промышленной экологии

ПРОЕКТНАЯ ШКОЛА ХИМТЕХА

**Всероссийский конкурс
юных исследователей окружающей среды им. Б.В. Всесвятского (с
международным участием)**

**«Плазменно-каталитическая деструкция органических красителей в
диэлектрическом барьерном разряде»**

Выполнила:

Агамурдова Эльмира Шамилевна

Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение "Средняя
школа №26 с углубленным изучением предметов естественно-научного цикла
«Проектная школа Химтех»

Руководитель:

Гусев Григорий Игоревич,

К.х.н., доц. кафедры промышленной экологии
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
химико-технологический университет»

Иваново – 2024 г.

Аннотация

Работа посвящена исследованию деструкции красителя кислотный красный 2С в совмещенных плазменно-каталитических процессах с использованием катализаторов – платины, нанесенной на оксид алюминия, а также циркония, нанесенного на вермикулит, а также без катализаторов. Наибольшая эффективность деструкции наблюдается при времени контакта с зоной горения плазмы 5,9 секунд. При увеличении мощности, вкладываемой в разряд, а также частоты приложенного напряжения, возрастает и эффективность очистки. Константа скорости деструкции при обработке без катализатора составляет $0,49 \pm 0,07 \text{ с}^{-1}$, а эффективность процесса разложения кислотного красного $\sim 79 \%$. При использовании катализаторов в системе, эффективность повышается только в случае использования Zr (5 %) нанесенный на вермикулит ($\sim 94 \%$), константа скорости деструкции составила $0,99 \pm 0,26 \text{ с}^{-1}$. С использованием катализатора Pt/Al₂O₃, эффективность снижается ($\sim 60 \%$). При обработке растворов кислотного красного рН растворов снижается, что может свидетельствовать об образовании кислот.

Работа содержит 2 таблицы, 12 рисунков, 17 литературных источников и изложена на 19 страницах.

Содержание

1. ВВЕДЕНИЕ	4
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	8
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ	11
ВЫВОДЫ	17
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	18

1. ВВЕДЕНИЕ

Промышленные предприятия являются одним из наиболее значимых источников органических загрязнителей. Наибольшую опасность представляют химические, нефтехимические и текстильные производства. В процессе деятельности этих предприятий в водные объекты поступают разнообразные органические соединения, включая фенолы, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), растворители и красители. Например, текстильные предприятия сбрасывают сточные воды, содержащие синтетические красители и другие химикаты, используемые в процессе крашения и обработки тканей [1].

Для контроля и предотвращения загрязнения водных объектов органическими веществами используются различные методы и технологии. Среди них можно выделить внедрение систем очистки сточных вод на промышленных предприятиях и в сельскохозяйственных комплексах, использование экологически безопасных агротехнологий, а также разработку и применение эффективных методов мониторинга качества воды. Современные системы очистки сточных вод включают физико-химические и биологические методы, такие как адсорбция, коагуляция, флокуляция, биологическая очистка и использование мембранных технологий [2].

Органические загрязнители оказывают серьезное и многогранное воздействие на водные экосистемы, оказывая негативное влияние на биологическое разнообразие, физико-химические свойства воды и ее возобновляемые ресурсы. Некоторые органические загрязнители могут изменять физико-химические свойства воды, такие как рН, содержание кислорода, температура и прозрачность. Например, органические загрязнители могут вызвать увеличение содержания органических веществ в воде, что приводит к увеличению потребности в кислороде для их разложения (биохимическая потребность в кислороде, БПК) и снижению содержания растворенного кислорода в воде, что в свою очередь может привести к развитию гипоксии и массовым отмираниям рыб и других водных организмов [3].

Таким образом, воздействие органических загрязнителей на водные экосистемы является серьезной проблемой, требующей комплексного подхода к решению. Эффективное управление качеством водных ресурсов и сохранение биологического разнообразия требует разработки и внедрения современных методов очистки сточных вод, контроля за выбросами загрязнителей и восстановления загрязненных водоемов. Важную роль в этом процессе играют международное сотрудничество и обмен передовыми технологиями и практиками.

Текстильная промышленность является одной из наиболее значимых отраслей, вносящих существенный вклад в экономику многих стран. Она включает в себя полный цикл обработки волокнистых материалов, начиная от их производства и заканчивая конечной обработкой тканей. Важным аспектом работы текстильных предприятий является использование большого

количества воды на различных этапах производства, что приводит к образованию значительных объемов сточных вод. Эти сточные воды содержат разнообразные загрязнители, которые могут негативно воздействовать на окружающую среду. Такие процессы как пропитка, нанесение аппретов и заключительное отбеливание вносят наибольший вклад в загрязнение водных объектов. Сточные воды этого этапа содержат смолы, формальдегиды, силиконы и другие химические вещества [4].

Сточные воды текстильных производств отличаются сложным и разнообразным составом, что затрудняет их очистку [5, 6].

Очистка сточных вод текстильных производств представляет собой сложную задачу из-за высокого содержания разнообразных и устойчивых загрязнителей. Традиционные методы очистки, такие как механическая, химическая и биологическая очистка, часто не обеспечивают полного удаления всех загрязнителей. Необходимы разработки и внедрение новых, более эффективных технологий очистки, таких как адсорбция на активированном угле, использование мембранных технологий и плазменных методов.

Таким образом, текстильная промышленность является значительным источником загрязнения водных объектов. Сточные воды, образующиеся на различных этапах производства, содержат широкий спектр органических и неорганических загрязнителей, что требует комплексного подхода к их очистке и утилизации. Для минимизации негативного воздействия на окружающую среду необходимо развивать и внедрять современные технологии очистки, а также проводить регулярный мониторинг и контроль качества сточных вод.

Анализируя современное состояние методов очистки сточных вод от красителей, следует отметить их разнообразие, при этом сохраняется актуальность оптимизации существующих и поиск новых методов очистки, а также создание новых высокоэффективных и экономически рациональных технологий обезвреживания сточных вод от красителей [7].

Текстильные производства используют различные типы красителей, включая азокрасители, реактивные, кислотные, дисперсные и прямые красители. Эти красители обладают высокой стойкостью к разложению, что затрудняет их удаление из сточных вод. Азокрасители, например, содержат азогруппы ($-N=N-$), которые могут образовывать токсичные ароматические амины при разложении. Реактивные красители связываются с тканями через ковалентные связи, что делает их устойчивыми к биологическому разложению. Кроме конкретных химических веществ, сточные воды текстильных производств характеризуются определенными физико-химическими параметрами, такими как высокая температура, щелочность, высокое содержание взвешенных веществ и химическая потребность в кислороде (ХПК). Эти параметры могут оказывать негативное воздействие на водные экосистемы и затруднять процессы очистки воды [7].

Таким образом, сточные воды текстильных производств представляют собой сложную смесь различных загрязнителей, требующих применения

комплексных методов очистки для минимизации их воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

Химия высоких энергий играет ключевую роль в современных методах очистки сточных вод, особенно при удалении устойчивых органических загрязнителей, таких как красители, фармацевтические препараты и пестициды. Эти методы основаны на использовании различных форм энергии для инициирования химических реакций, которые приводят к разрушению загрязнителей или их преобразованию в менее вредные вещества. Основные методы химии высоких энергий включают фотокатализ, озонирование и электрокатализ. Фотокатализ — это процесс, при котором свет, обычно ультрафиолетовый (УФ), используется для активации полупроводникового материала, такого как диоксид титана (TiO_2), который в свою очередь производит реактивные виды кислорода. Эти виды, включая гидроксильные радикалы и супероксидные ионы, способны эффективно окислять и разрушать органические загрязнители. Диоксид титана является наиболее распространенным фотокатализатором благодаря своей высокой активности, химической стойкости и низкой стоимости [8].

Фотокатализ нашел широкое применение в очистке сточных вод благодаря своей способности разрушать широкий спектр органических соединений. Например, исследования показывают, что TiO_2 может эффективно удалять различные красители, включая метиленовый синий, родамин В и другие органические соединения, присутствующие в сточных водах текстильных предприятий. Дополнительно, фотокатализ может быть комбинирован с другими методами очистки, такими как биологическая очистка, для достижения более высоких уровней удаления загрязнителей.

Озонирование — это метод очистки сточных вод, при котором озон (O_3) используется в качестве окислителя. Озон обладает высоким окислительным потенциалом и способен разрушать широкий спектр органических и неорганических загрязнителей. При озонировании озон распадается с образованием гидроксильных радикалов, которые являются сильными окислителями и могут быстро разрушать загрязнители.

Одним из преимуществ озонирования является его эффективность в удалении цветности и запаха сточных вод, а также в уничтожении микробных патогенов. Это делает озонирование особенно полезным для очистки сточных вод, содержащих стойкие органические загрязнители, такие как фенолы, пестициды и фармацевтические препараты. Исследования показывают, что озонирование может эффективно удалять такие загрязнители, как тетрахлорэтилен, трихлорэтилен и другие хлорорганические соединения [9].

Использование плазменных технологий в очистке сточных вод представляет собой одну из наиболее передовых и эффективных методик для удаления органических и неорганических загрязнителей. Плазма, или четвертое состояние вещества, характеризуется наличием свободных электронов, ионов и нейтральных частиц, что делает её чрезвычайно реакционноспособной. В контексте очистки сточных вод, плазменные технологии используют эту высокую реакционную способность для

разрушения стойких органических загрязнителей, дезинфекции и удаления тяжелых металлов [10].

Плазменные технологии основаны на генерации высокоэнергетических частиц, которые взаимодействуют с молекулами загрязнителей, разрушая их до более простых и менее токсичных соединений. Существует несколько типов плазменных установок, используемых для очистки сточных вод, включая барьерные разрядные плазменные установки, коронные разряды и плазменные дуговые разряды.

Барьерный разряд представляет собой одну из наиболее широко используемых плазменных технологий для очистки сточных вод. В этом методе используется высокочастотное напряжение для создания плазмы между двумя электродами, разделенными диэлектрическим барьером. Барьерный разряд эффективно генерирует активные виды, такие как озон, радикалы гидроксила и другие реакционноспособные частицы, которые разрушают органические загрязнители в воде [11].

Плазменные дуговые разряды создаются при пропускании электрического тока через газ, создавая высокотемпературную плазму. Эта плазма способна разрушать сложные органические молекулы, такие как красители и пестициды, преобразуя их в углекислый газ, воду и другие простые молекулы. Плазменные дуговые разряды также эффективны для удаления тяжелых металлов из сточных вод путем их осаждения или [12].

Плазменные технологии представляют собой перспективное направление в области очистки сточных вод благодаря своей высокой эффективности и способности разрушать широкий спектр загрязнителей. Несмотря на существующие ограничения, такие как высокая стоимость и энергозатраты, плазменные технологии продолжают развиваться и находят все большее применение в промышленности. Сочетание плазменных методов с другими технологиями очистки может значительно повысить их эффективность и экономическую целесообразность, обеспечивая устойчивое управление водными ресурсами и защиту окружающей среды [13].

Целью исследования является выявление закономерностей деструкции красителя кислотного красного 2С в плазме диэлектрического барьерного разряда с варьированием параметров обработки.

Задачи, поставленные в данной работе:

1. Исследование деструкции кислотного красного 2С в плазме диэлектрического барьерного разряда с катализаторами и без;
2. Установление констант скорости деструкции;
3. Оптимизация параметров обработки.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве модельного загрязняющего вещества использовался водный раствор содержащий кислотный красный 2С (рис. 1). Модельный раствор красителя готовится смешиванием навески красителя с дистиллированной водой. Начальная концентрация красителя варьировалась в диапазоне – 5 – 100 мг/л.

Кислотный красный 2С



Химическая формула

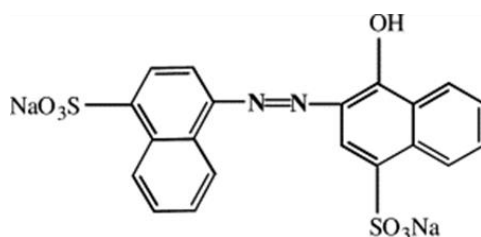


Рис. 1. Кислотный красный 2С и его химическая формула.

В качестве катализаторов использовали Pt/Al₂O₃ и вермикулит+Zr 5 %. Катализатор Pt/Al₂O₃ обладает достаточно большой удельной поверхностью (155,4 ± 1,1 м²/г) [14], а вермикулит+Zr 5 % на порядок меньшей -15,1 м²/г [15]. Масса катализаторов, помещаемых в зону горения плазмы, во всех экспериментах составляла 1 г, который располагались внутри разрядной зоны на специальной подложке, сделанной из фторопласта.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2, основным элементом которой являлся реактор диэлектрического барьерного разряда (рис. 3). Контроль значений первичного напряжения осуществлялся вольтметром марки Д 5015. Источник с частотой напряжения, приложенного к электродам 800 Гц, обладает среднеквадратичным значением напряжения 16,5 кВ (рис. 4). При этом ток разряда составляет 13,08 мА. Объемная мощность, вкладываемая в разряд (P, Вт/см³), с использованием данного источника 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:

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

где $S_{\text{сеч.}}$, см^2 – площадь сечения разрядной зоны, $L_{\text{р.з.}}$, см – длина разрядной зоны.

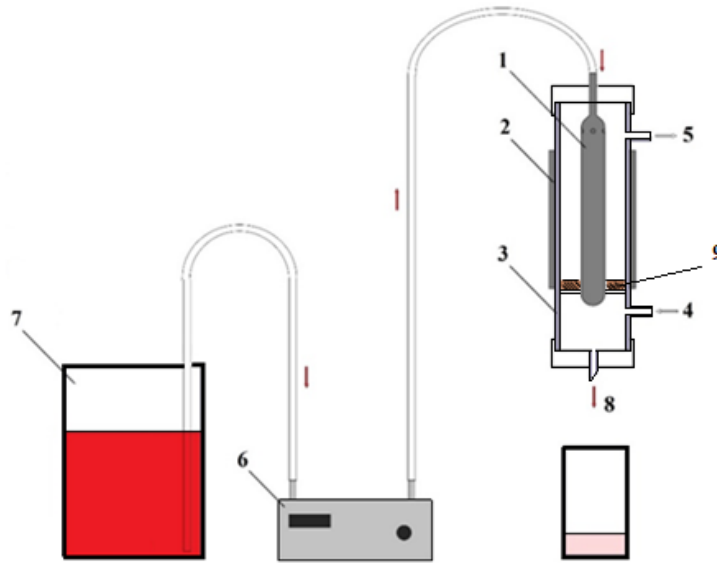


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

1 – внутренний электрод; 2 – внешний электрод; 3 – стеклянная трубка; 4 – вход газа (кислород); 5 – выход газа; 6 – насос; 7 – раствор красителя; 8 – обработанный раствор, 9 – слой катализатора на фторопластовой подложке.

Объем разрядной зоны реактора ДБР с коаксиальным расположением электродов составлял 25 см^3 . В качестве плазмообразующего газа во всех экспериментах использовался технический кислород, расход которого во всех опытах составлял 500 мл/мин ($8,33 \text{ мл/с}$). Контроль значений первичного напряжения осуществлялся вольтметром марки Д 5015. Типичные формы импульсов тока и напряжения разряда приведены на рис. 4. Оба сигнала были записаны цифровым двухканальным осциллографом GW Instek GDS-2072 (Instek, Тайвань). Входную мощность определяли путем интегрирования произведения обеих форм сигнала за период.

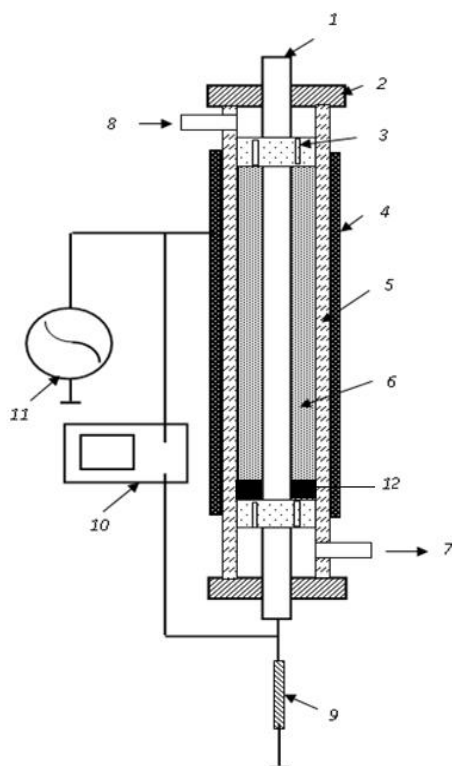


Рис. 3. Реактор с коаксиальным расположением электродов.

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 с катализатором.

Время контакта с разрядной зоной реактора τ изменялось в диапазоне приблизительно 0,39 – 5,91 с. Величины τ рассчитывались по формуле (7), 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.

Толщина слоя жидкости при ламинарном течении в поле силы тяжести может быть рассчитана [16]:

$$h = 0.908 \cdot \left(\frac{v^2}{g} \text{Re} \right)^{1/3} \quad (3)$$

где $g = 9,8$ м/с² – ускорение силы тяжести, v – кинематическая вязкость (м²/с), Re – критерий Рейнольдса. Критерий Рейнольдса рассчитывался по формуле:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot Q}{\pi D \cdot v} \quad (4)$$

где Q – объемный расход жидкости м³/с, D – диаметр цилиндра. Объединяя формулы (1) и (2) вместе, получим:

$$h = \left(\frac{3v}{g} \cdot \frac{Q}{\pi D} \right)^{1/3} \quad (5)$$

Кинематическая вязкость воды может была рассчитана по соотношению:

$$v(T) = \frac{1.78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0.0337(T - 273) + 0.000221(T - 273)^2} \quad (6)$$

Поскольку температура в процессе обработки изменяется мало, то время контакта τ можно рассчитать по формуле:

$$\tau = \frac{\pi D \cdot h \cdot L}{Q} \quad (7)$$

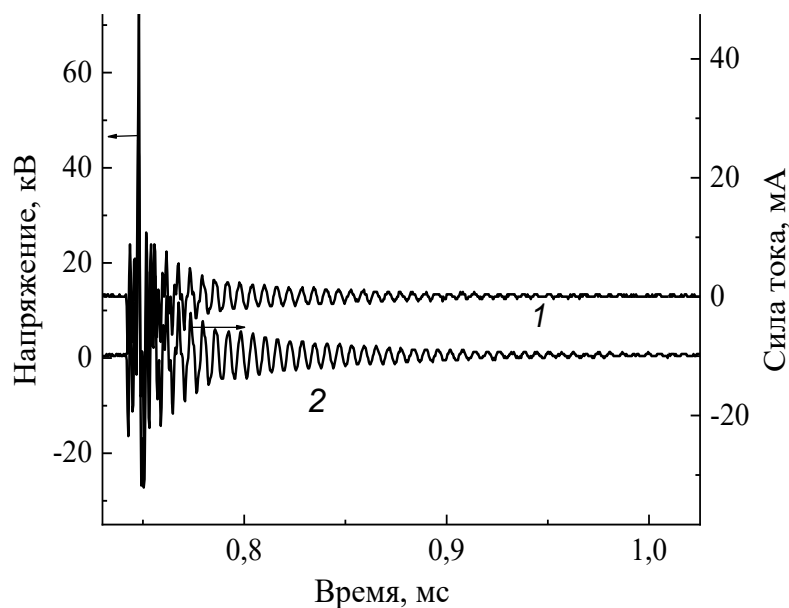


Рис. 4. – Типичные формы импульсов тока и напряжения разряда.

Концентрацию кислотного красного 2С в растворе определяли спектрофотометрическим методом по спектрам поглощения в диапазоне длин волн 200-800 нм, имеющим основную полосу поглощения с максимумами 515 нм для кислотного красного 2С [17]. 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.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначальным этапом исследований деструкции красителя кислотный красный 2С являлось определение оптимальных параметров при обработке растворов, содержащих краситель, в плазме ДБР. Параметры проведения эксперимента по определению эффективности деструкции в плазме ДБР представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры эксперимента	
Расход газа, л/мин	0,5
Время контакта, сек (расход жидкости (мл/сек))	5,9 (0,08)
Конц-я красителя, мг/л	100

Снижение концентрации кислотного красного от объемной мощности, вкладываемой в разряд (без катализатора) представлена на рис. 5 и в таблице 2.

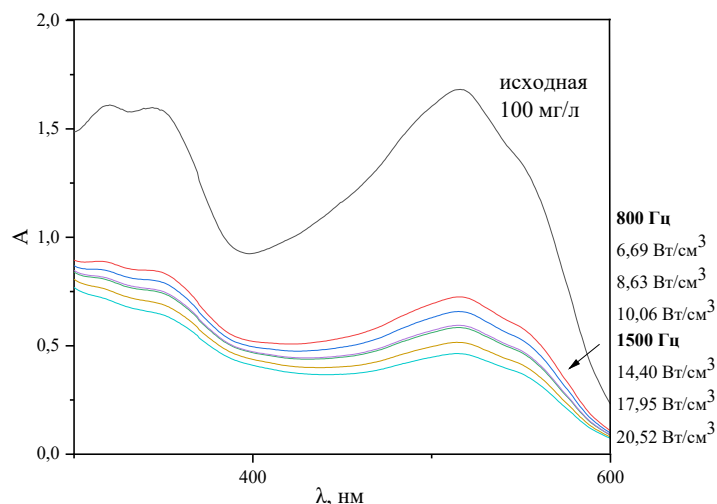


Рис. 5. UV-Vis спектры поглощения кислотного красного 2С от объемной мощности, вкладываемой в разряд (без катализатора).

Таблица 2

Эффективность деструкции кислотного красного от объемной мощности, вкладываемой в разряд

Объемная мощность	Эффективность, %
800 Гц	
6,69 Вт/см ³	56,4
8,63 Вт/см ³	60,7
10,06 Вт/см ³	64,1
1500 Гц	
14,40 Вт/см ³	65,2
17,95 Вт/см ³	69,4
20,52 Вт/см ³	72,4

Как видно из спектров, а также из табличных значений, чем больше частота, и следовательно – мощность, вкладываемая в разряд – тем выше эффективность. Однако, с точки зрения экономических затрат, оптимальной мощностью при которой в дальнейшем проводились работы - 8,63 Вт/см³. Рост мощности практически в 2,5 раза приводит к росту эффективности всего лишь на 11 %.

Предполагая, что кислотный красный 2С в рассматриваемых процессах подвергается деструкции, то изменение концентрации красителя в растворе будет описываться уравнением:

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

где: K – эффективный коэффициент скорости (c^{-1}), C – концентрация красителя после обработки в ДБР, C_0 – начальная концентрация в растворе, τ_k – время контакта (с).

На рисунке 6 показано изменение UV-Vis спектра поглощения кислотного красного 2С, который, как хромофор, характеризуется двумя основными полосами поглощения в водном растворе - при 515 и 340 нм [17]. Уменьшение первой указывает на деградацию ароматической части красителя. Наибольшая эффективность деструкции наблюдается при времени контакта 5,9 секунд и составляет почти 80 % (рис. 7).

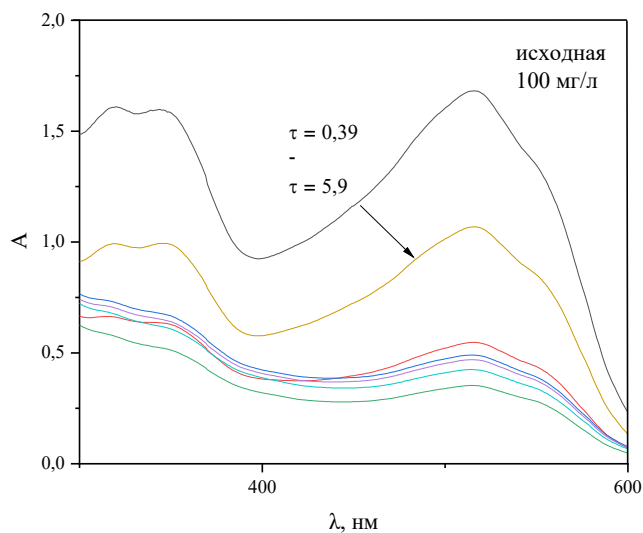


Рис. 6. UV-Vis спектры поглощения кислотного красного 2С от времени контакта с зоной разряда (без катализатора).

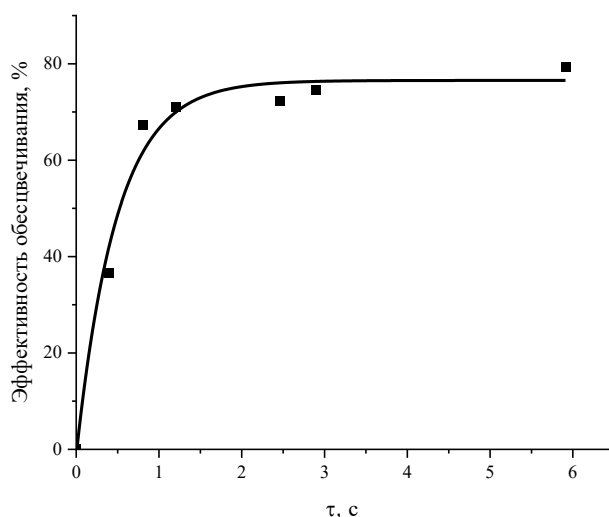


Рис. 7. Эффективность разложения кислотного красного от времени контакта с зоной разряда.

Как видно из рисунка 8, наибольшая эффективность деструкции наблюдается при времени контакта 5,9 секунд.

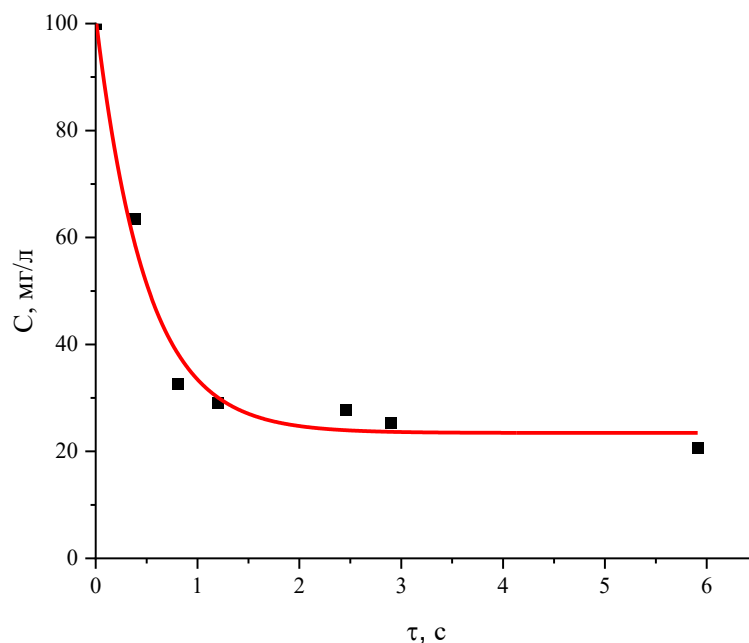


Рис. 8. Снижение концентрации кислотного красного от времени контакта с зоной разряда (без катализатора).

Константа скорости деструкции составила $K=0,49 \pm 0,07 \text{ с}^{-1}$.

При использовании катализатора - платина, нанесенной на оксид алюминия, эффективность процесса снижается, и при времени контакта 5,9 секунд и составляет всего лишь 60 % (рис. 9). Вероятно, это связано с тем, что катализатор негативно влияет на образование озона и других активных частиц в системе, поэтому дальнейшие работы с данным катализатором не проводились.

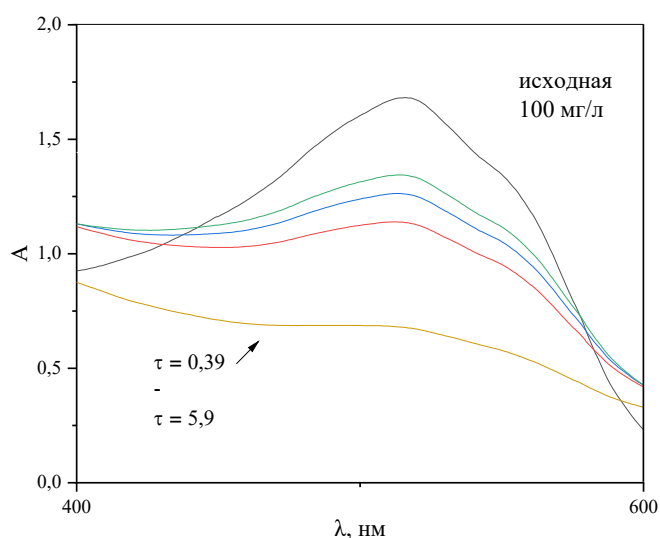


Рис. 9. UV-Vis спектры поглощения кислотного красного 2С от времени контакта с зоной разряда (Pt/Al₂O₃).

Эффективность разложения кислотного красного от времени контакта с зоной разряда с использованием циркония в качестве катализатора, наоборот показывает положительные эффекты, причем на во всем диапазоне времен контакта. Так наибольшая эффективность деструкции наблюдается при времени контакта 5,9 секунд и составляет почти 94 %, что на 14 % выше, чем без катализатора (рис. 10 и рис. 11).

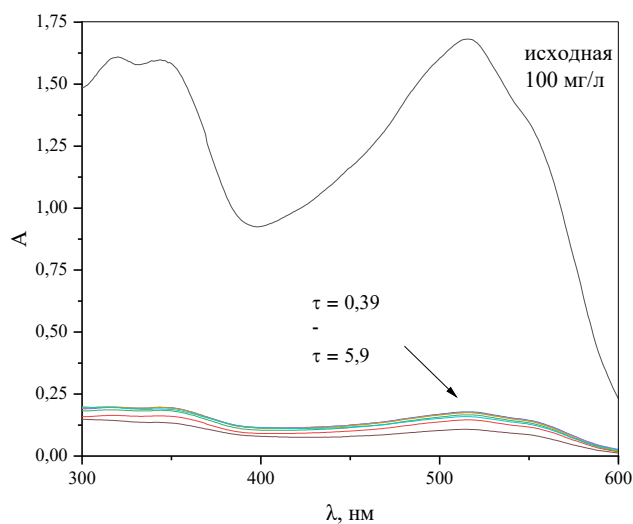


Рис. 10. UV-Vis спектры поглощения кислотного красного 2С от времени контакта с зоной разряда (Zr 5 %).

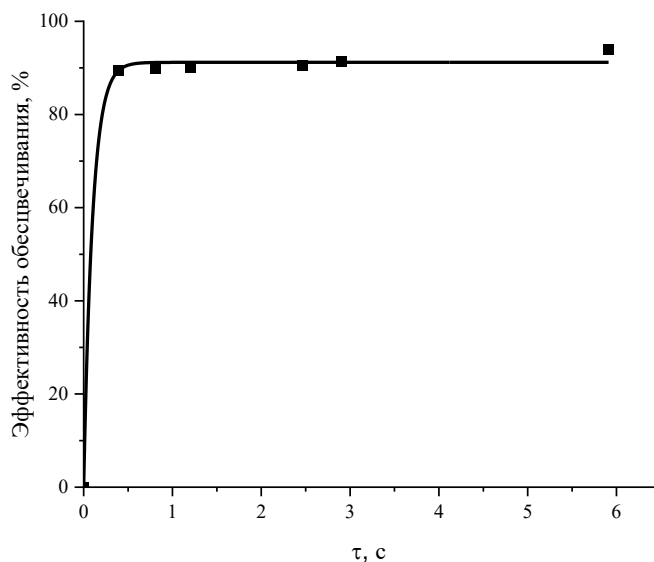


Рис. 11. Эффективность разложения кислотного красного от времени контакта с зоной разряда (Zr 5 %).

Изменение концентрации красителя в растворе описывается в таком случае также уравнением псевдопервого порядка (рис. 12). Полученная из уравнения константа скорости деструкции составила $0,99 \pm 0,26 \text{ с}^{-1}$. Таким

образом, присутствие в системе катализатора – циркония, нанесенного на вермикулит, приводит к значительному повышению эффективности разложения красителя.

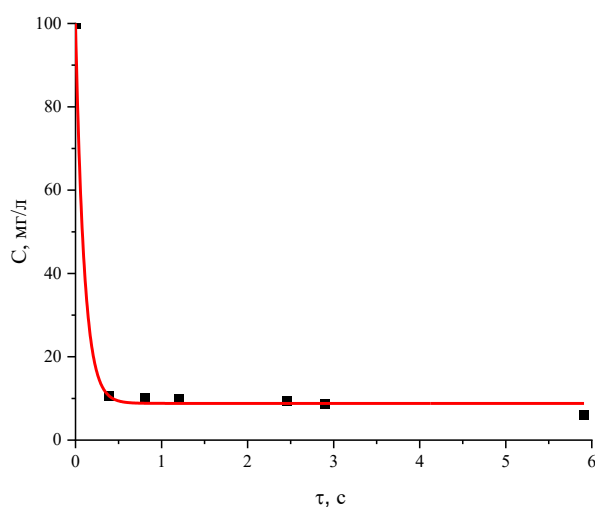


Рис. 12. Снижение концентрации кислотного красного от времени контакта с зоной разряда (Zr 5 %).

Обработка водных растворов без катализатора, приводит к снижению pH растворов. Это говорит об образовании кислых продуктов деструкции. В дальнейшем будут проведены эксперименты по установлению механизма деструкции красителя, и определены промежуточные и конечные продукты его деструкции в газовой и жидкой фазах.

ВЫВОДЫ

1. Наибольшая эффективность деструкции красителя кислотный красный 2С наблюдается при времени контакта с зоной горения плазмы 5,9 секунд.
2. При увеличении мощности, вкладываемой в разряд, а также частоты приложенного напряжения, возрастает и эффективность очистки.
3. Константа скорости деструкции при обработке без катализатора составляет $0,49 \pm 0,07 \text{ с}^{-1}$, а эффективность процесса разложения кислотного красного $\sim 79 \%$.
4. При использовании катализаторов в системе, эффективность повышается только в случае использования Zr (5 %) нанесенный на вермикулит ($\sim 94 \%$), константа скорости деструкции составила $0,99 \pm 0,26 \text{ с}^{-1}$.
5. С использованием катализатора Pt/Al₂O₃ эффективность снижается ($\sim 60 \%$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Севостьянов А. Г. Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности. – 1980.
2. Двадненко М. В. и др. Адсорбционная очистка сточных вод //Современные наукоемкие технологии. – 2010. – №. 10.
3. Баранова А. Ф., Мамедов С. Н., Погодина И. В. Экологические проблемы текстильной промышленности и пути их решения //Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2019. – №. 4.
4. Мирзалимова С. А., Мухамедиев М. Г., Киршина Е. Ю. Текстильные предприятия как источники токсичности сточных вод //Universum: химия и биология. – 2021. – №. 10-1 (88). – С. 20-24.
5. Wang L. K. et al. (ed.). Handbook of industrial and hazardous wastes treatment. – CRC Press, 2004.
6. Rita Kant R. K. Textile dyeing industry an environmental hazard. – 2012.
7. Евлантьев С. С., Войтюк А. А., Сахарова Н. А. Исследование методов очистки сточных вод текстильного производства от красителей. – 2012.
8. Воронцов А. В. и др. Фотокатализ: преобразование энергии света для окисления, дезинфекции и разложения воды //Кинетика и катализ. – 2010. – Т. 51. – №. 6. – С. 829-836.
9. Орлов В. А. Озонирование воды. – 1984.
10. Chang J. S., Lawless P. A., Yamamoto T. Corona discharge processes //IEEE Transactions on plasma science. – 1991. – Т. 19. – №. 6.
11. Oda T. Non-thermal plasma processing for environmental protection: decomposition of dilute VOCs in air //Journal of electrostatics. – 2003. – Т. 57. – №. 3-4. – С. 293-311.
12. Fridman A. Plasma chemistry. – Cambridge university press, 2008.
13. Великодный В. Ю. и др. Плазменные технологии очистки сточных вод //Прикладная физика. – 2008. – №. 6.
14. Gusev G.I., Gushchin A.A., Grinevich V.I., Izvekova T.V., Kvitkova E.Yu., Rybkin V.V. Destruction of aqueous solutions of 2,4-dichlorophenol in a plasma-catalytic barrier discharge reactor. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2021. V. 64. N 11. P. 103-111.
15. Lapshova K. A. et al. Destruction of 2, 4-dichlorophenol vapor in a process involving the combined action of DBD in oxygen and a catalyst //Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2024. – V. 44. – №. 2. – P. 853-865.
16. 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.
17. Daneshvar N., Salari D., Khataee A. R. Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water on ZnO as an alternative catalyst to TiO₂ //Journal of

photochemistry and photobiology A: chemistry. – 2004. – V. 162. – №. 2-3. – P. 317-322.