

ФОТОДЕСТРУКЦИЯ РОДАМИНА С В ПРИСУТСТВИИ ПЕРСУЛЬФАТА АММОНИЯ

А.А. Иванов

*Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева, anton.blackwolfneo@gmail.com*

В работе изучена фотодеструкция синтетических красителей в присутствии персульфата аммония на примере родамина С. Установлено, что в присутствии $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ достигается практически полная деструкция родамина С (99,9%), что в 2,3 раза выше, чем в случае индивидуальной фотодеструкции.

Ключевые слова: фотодеструкция, персульфат аммония, сульфат-радикал, родамин С, Advanced Oxidation Process.

Введение

Вопросам очистки сточных вод уделяется все больше внимания. Во многом это обусловлено активным развитием промышленности, которое сопровождается ростом антропогенной нагрузки и нередко увеличением объемов сточных вод [1]. Серьезной проблемой остаются сточные воды, содержащие синтетические красители, характерные для лакокрасочной, текстильной, целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности. Согласно некоторым данным, до 15% от общего объема мирового производства красящих продуктов поступает в окружающую среду [2].

Попадание синтетических красителей в водные объекты приводит к снижению концентрации растворенного кислорода и светопропускания, в результате чего происходит нарушение биохимических процессов гидробионтов. Помимо этого, некоторые красители, способны к биоаккумуляции в трофических цепях, где они трансформируются в более токсичные соединения [3]. Синтетические красители могут также оказывать мутагенное, канцерогенное и прямое токсическое действие, приводящее к кожным раздражениям и дерматитам, астме, нарушениям работы центральной нервной и репродуктивной систем [4].

Для очистки сточных вод от синтетических красителей применяются различные методы, включая физико-химические, химические и биологические [5]. Все обладают рядом преимуществ и ограничений. К физико-химическим методам относят адсорбцию, мембранные процессы, ионный обмен. Адсорбция трудно применима для высококонцентрированных стоков, а также сопряжена с необходимостью регенерации отработанных адсорбентов. Мембранные процессы, несмотря на высокую эффективность очистки, характеризуются высокими операционными затратами и, в случае обратного осмоса, приводят к значительному образованию концентрата [6]. Химические методы сопряжены с большими реагентными затратами и вторичным загрязнением сточных вод.

Недостатки существующих методов очистки сточных вод от синтетических красителей обуславливают актуальность разработки и внедрения более эффективных и передовых.

Таким направлением являются методы усовершенствованного окисления – AOP (Advanced Oxidation Processes) [7, 8]. Их главной особенностью стало применение высокореакционных свободных радикалов (гидроксил-, гидропероксильный радикалы), действие которых позволяет с высокой эффективностью минерализовать органические загрязнители. Среди этих методов особый интерес вызывают SR-AOP (Sulfate-Radical based AOP), основанные на применении сульфат-радикалов, обладающих высоким окислительным потенциалом [9, 10]. В качестве источников сульфат-радикалов могут выступать пероксодисерная кислота ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$) или ее соли персульфаты ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$). Для генерации сульфат-радикалов

используют различные методы: нагревание, катализ переходными металлами, пропускание электрического тока, УФ-излучение и др.

Среди этих методов наибольший интерес представляет фотолитический способ, поскольку он основан на высокоинтенсивных фотоокислительных процессах и позволяет удалять широкий спектр загрязняющих веществ. Генерация сульфат-радикалов с помощью УФ-излучения проходит согласно уравнению 1:



Основной целью данной работы является оценка возможности применения фотолитического окисления в присутствии персульфатов для очистки сточных вод от синтетических красителей.

Материалы и методы

В качестве модельного загрязняющего вещества был выбран синтетический аминоксантовый краситель родамин С. В промышленности данный краситель применяется для окрашивания косметических средств, в производстве чернил, в качестве органического люминофора, флуоресцентного индикатора, краситель устойчив в окружающей среде, обладает высокой токсичностью и канцерогенными свойствами [11]. Исходная концентрация родамина С в модельном растворе составила 3 мг/дм³.

Для окисления модельного загрязняющего вещества использовали персульфат аммония. Доза окислителя варьировалась в диапазоне 2,5 – 10 мг/мг загрязняющего вещества (далее мг/мг). Время контакта во всех опытах составило 30 минут.

Опыты по фотодеструкции проводили с помощью импульсной ксеноновой лампы ФП-05/120 (ООО «НПП «Мелитта»») с частотой импульса 6 Гц. Экспериментальная установка подробно описана в [12].

Эффективность окисления красителя определялась расчетным методом исходя из начальных и конечных концентраций, которые измерялись фотометрически с использованием фотоэлектроколориметра ЗОМС КФК 3-01.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследования было изучено окисление родамина С персульфатом аммония. Результаты представлены на рисунке 1.

Согласно полученным данным, максимальная степень очистки от красителя при индивидуальном применении персульфата аммония достигается при дозе 10 мг/мг, однако не превышает 10%, что, вероятно обусловлено высокой устойчивостью красителя из-за наличия в нем ксантовой структуры (два ароматических ядра, соединенных между собой кислородным мостиком). Это указывает на ограниченную эффективность процесса и необходимость интенсификации генерации сульфат-радикалов с использованием УФ-излучения.

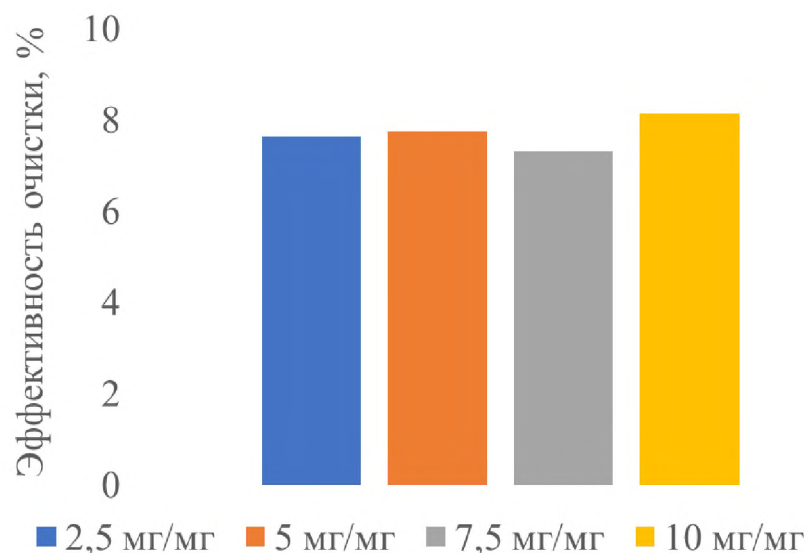


Рис. 1. Эффективность окисления родамина С с помощью персульфата аммония.

На следующем этапе эксперимента была проведена фотодеструкция родамина С в присутствии $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$. Доза окислителя составила 10 мг/мг. Результаты приведены на рисунке 2.

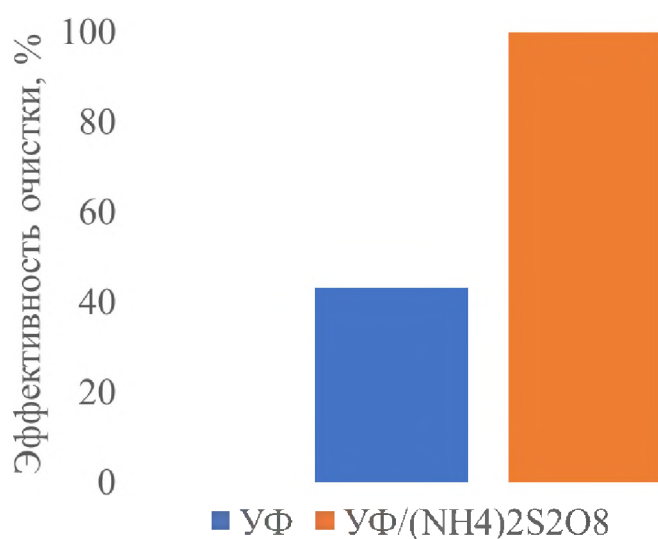


Рис. 2. Эффективность фотокаталитического окисления родамина С.

Как видно из данных, приведенных на рисунке 2, индивидуальное применение УФ-излучения обеспечивает деструкцию родамина С с эффективностью 43,3%, что в 5,3 раза выше по сравнению с применением персульфата аммония. Фотодеструкция родамина С в присутствии $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ позволяет достичь практически полной деструкции красителя (99,9%), что в 12,2 раза выше относительно применения индивидуального окислителя и в 2,3 раза выше, чем при индивидуальной фотодеструкции. Это явление свидетельствует об образовании сульфат-радикалов, которые значительно повышают эффективность процесса окисления.

Выводы

Результаты исследования показывают перспективность применения системы УФ/(NH₄)₂S₂O₈ для эффективной очистки сточных вод от синтетических красителей. Установлено, что персульфат аммония позволяет значительно увеличить (в 2,3 раза) эффективность фотодеструкции родамина С, что объясняется образованием сульфат-радикалов. Полученные результаты позволяют выдвинуть предположение о возможности использования данного метода для деструкции других устойчивых органических загрязняющих веществ сточных вод.

Библиографический список

1. Thao T. T. P. et al. Microbial biodegradation of recalcitrant synthetic dyes from textile-enriched wastewater by *Fusarium oxysporum* // *Chemosphere*. – 2023. – Т. 325. – С. 138392.
2. 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.
3. Elgarahy A. M. et al. A critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2021. – Т. 4. – С. 100209.
4. Tounsadi H. et al. Impact of chemical substances used in textile industry on the employee's health: Epidemiological study // *Ecotoxicology and environmental safety*. – 2020. – Т. 197. – С. 110594.
5. Forgacs E., Cserhádi T., Oros G. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review // *Environment international*. – 2004. – Т. 30. – №. 7. – С. 953-971.
6. Ochando-Pulido J. M. et al. Analysis of the concentration polarization and fouling dynamic resistances under reverse osmosis membrane treatment of olive mill wastewater // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2015. – Т. 31. – С. 132-141.
7. Kuznetsov V. V. et al. Study of the Process of Electrochemical Oxidation of Active Pharmaceutical Substances on the Example of Nitrofurazone ((2 E)-2-[(5-Nitro-2-furyl) methylene] hydrazine Carboxamide) // *Water*. – 2023. – V. 15. – N. 19. – P. 3370.
8. Sarantseva A. A., Ivantsova N. A., Kuzin E. N. Investigation of the Process of Oxi-dative Degradation of Phenol by Sodium Ferrate Solutions // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2023. – Т. 93. – №. 13. – С. 3454-3459.
9. Любушкин Т.Г. и др. Оценка возможности использования пероксодисерной кислоты в процессах очистки сточных вод, содержащих синтетические красители // *Известия Высших Учебных Заведений. Серия «Химия и химическая технология»*. – 2025. – Т. 68. – №. 1. – С. 120-126.
10. Liubushkin T.G. et al. Photochemical Oxidation of Antibacterial Drugs in the Presence of Oxygen-Containing Additives // *High Energy Chemistry*. – 2025. – V.59. – N. 1. – P. 40-44.

11. Zhang X. et al. Efficient removal of Rhodamine B in wastewater via activation of persulfate by MnO_2 with different morphologies //Water. – 2023. – Т. 15. – №. 4. – С. 735.

12. Шлыкова А. Ю. и др. Кинетика деструкции метиленового синего под воздействием импульсной ксеноновой лампы //Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2024. – №. 3. – С. 136-145.