



УДК 66.087.5

УДАЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИИ

Лелюх Полина Юрьевна

студент

Терпигорева Инна Валерьевна

к.т.н., доцент

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Аннотация. Загрязнение воды стойкими фармацевтическими соединениями становится все более серьезной проблемой в современном мире, и многие исследователи работают над смягчением последствий такого загрязнения. Одним из многообещающих перспективных методов является использование электрохимических процессов, поскольку они представляют собой простую и высокоэффективную технологию с небольшими габаритами. Метод электрокоагуляции (ЭК) в настоящее время получает внимание исследовательского сообщества за счет своих привлекательных преимуществ в виде эффективности, простоты и стоимости использования. В данной статье проводится краткий обзор современных исследований, посвященных определению эффективности использования метода ЭК для удаления фармацевтических загрязнителей из сточных вод. Представлены положительные результаты, которые в настоящее время показывают очень высокие показатели. Для удаления некоторых загрязнителей метод ЭК не показывает высокие показатели на сегодняшний день, однако являются перспективными с точки зрения дальнейших исследований. Также имеются сведения об эффективности совместного использования с другими методами.

Ключевые слова: электрокоагуляция, очистка воды, защита окружающей среды, фармацевтические вещества.

1. Введение

Постоянный рост населения и высокая заболеваемость привели к тому, что большое количество фармацевтических препаратов используется во многих областях, таких как сельское хозяйство, птицеводство, рыболовство и здоровье человека. Фармацевтические препараты можно разделить на три категории в соответствии с методами их производства: экстракционные, микробиологические и химические. Среди них основным направлением на сегодняшний день является химическая фармация. Несмотря на то, что фармацевтические препараты приносят большую пользу людям, они также наносят значительный вред окружающей среде из-за своей структурной стабильности и неподверженности биологическому

разложению. Фармацевтические препараты как новые загрязнители присутствуют в различных средах окружающей среды, в том числе и в воде, что потенциально может оказывать негативное воздействие на гидросферу и здоровье человека и животных. Для производства фармацевтических препаратов необходимо большое количество воды, в то же время часть лекарственных препаратов и их компонентов попадают в воздух и канализацию при промывке оборудования и ввиду потерь, в результате чего образуется большое количество сточных вод, загрязненных фармацевтическими препаратами. Наличие фармацевтических препаратов в сточных водах рассматривается как серьезная проблема, решением которой занимается научное сообщество.

Основными характеристиками фармацевтических сточных вод являются:

- высокая концентрация органических загрязнителей, большие колебания концентрации и сложный состав;
- высокое значение БПК и ХПК в сточных водах;
- высокая концентрация $\text{NH}_3\text{-N}$ и цветовой оттенок;
- высокая концентрация взвешенных твердых веществ и солей.

Следовательно, фармацевтические сточные воды трудно полностью очистить на очистных сооружениях [1].

Метод электрокоагуляции эффективно применяется для удаления широкого диапазона загрязняющих веществ. В процессе ЭК используется электрический ток, который пропускается через электроды, что приводит к их растворению в реакторе при определенных условиях. Это растворение электрода вызывает повышенную концентрацию катионов, которые в конечном итоге осаждаются в виде гидроксидов и оксидов. Разнообразие различных анодных материалов, таких как алюминий, нержавеющая сталь, железо положительно сказывается на эффективности удаления фармацевтических загрязнителей. Благодаря простой процедуре и менее дорогостоящим материалам, метод ЭК обладает большими преимуществами для очистки фармацевтических сточных вод [2].

2. Современные исследования использования метода ЭК для очистки фармацевтических сточных вод

В исследовании [3] продемонстрирована целесообразность использования процесса ЭК в качестве метода удаления фармацевтических препаратов из реальных городских сточных вод. Серийные экспериментальные запуски проводились с использованием простого электрохимического реактора лабораторного масштаба с алюминием и нержавеющей сталью в качестве анода и катода соответственно. В качестве удаляемых фармацевтических препаратов выбраны диклофенак, карбамазепин и амоксициллин. Проводилось оценивание влияния различных ключевых параметров, а именно плотности тока, начальной концентрации

фармацевтических препаратов, продолжительности электролиза и режима применения (непрерывный или прерывистый) на эффективность удаления фармацевтических препаратов. По результатам высокое снижение содержания фармацевтических препаратов было зарегистрировано при повышенной плотности тока и длительной продолжительности электролиза из-за дополнительных электро-генерированных коагулянтов в растворе.

В [4] установка ЭК с различными конфигурациями пары анод-катод использовалась для удаления гидрохлорида окситетрациклина. Материал анода, время, плотность тока и начальная концентрация варьировались, чтобы определить влияние этих параметров на эффективность удаления. В частности, в качестве анодных материалов использовались железо и алюминий, а для катода - нержавеющая сталь. Было обнаружено, что алюминий более эффективен, чем железо, в качестве анодного материала для удаления гидрохлорида окситетрациклина. Оптимальная плотность тока составляла 20 мА/см^2 для обоих анодов: железо и алюминий имели эффективность удаления 93,2% и 87,75% соответственно. Также изучалось влияние начальной концентрации на эффективность удаления: увеличение исходной концентрации гидрохлорида окситетрациклина до 200 мг/л не оказало значительного влияния на его удаление. В ходе экспериментов были измерены водородный показатель pH, окислительно-восстановительный потенциал Eh и растворенный кислород во всех образцах: при обеих комбинациях анод-катод pH значительно увеличился, в то время как Eh и растворенный кислород существенно снизились. Также были рассчитаны энергозатраты на ЭК, демонстрирующие, что этот метод не требует больших затрат энергии. Наконец, были рассчитаны изотерма и кинетические параметры: и железный, и алюминиевый аноды подчиняются изотерме Sips и кинетике псевдопервого порядка.

В работе [5] проводилось исследование метода ЭК для уменьшения ХПК и мутности от мазей фармацевтических сточных вод при периодической работе в различных условиях. В исследовании проверено влияние температуры раствора, типа пары электродов, плотности тока, проводимости и начальной концентрации ХПК на эффективность снижения количества ХПК и уменьшения мутности. Экспериментальные результаты показали эффективность удаления ХПК 95% и уменьшение мутности 98% при использовании Fe/Al в качестве пары электродов. Удельное потребление энергии составляет 0,48 кВт·ч/кг ХПК после 20 минут времени электролиза. Оптимальная температура, плотность тока, проводимость и начальная концентрация ХПК оказались равными 298 К, $15,56 \text{ мА/см}^2$, 3,20 мСм см и 5000 мг/л соответственно.

В исследовании [6] проводится исследование эффективности удаления ибупрофена из питьевой воды при помощи ЭК. Анализ проводится путем оптимизации рабочих параметров и моделей кинетики/изотерм. В результате оптимизации удалено 63% загрязняющего вещества. В

результате двухэтапной ЭК эффективность удаления возросла и составила 73,8%. Отмечается, что метод ЭК можно рассматривать как перспективный метод удаления ибупрофена.

Также проводятся исследования по совместному использованию метода ЭК с другими методами очистки.

Например, в исследовании [7] проводилась очистка сточных вод фармацевтической промышленности путем сочетания трех процессов: ЭК, электрофентона (ЭФ) и фотокаталитического окисления (ФКО). Методы ЭК и ЭФ применялись для разложения стойких фармацевтических соединений, а после них проводился ФКО для удаления общего органического углерода (ООУ). Эффективность последовательной реализации процессов ЭК + ЭФ, ЭК + ФКО и ЭФ + ФКО была исследована с оптимизацией основных параметров: плотности тока, катализаторов, времени реакции и порядка обработки. Результаты последовательных процессов обработки показали снижение общего органического углерода (ООУ) на 64,0%, ХПК на 70,2% и БПК на 97,8%.

Стоит отметить, что не все исследования показывают оптимистичные результаты для использования метода ЭК в удалении фармацевтических загрязняющих веществ.

Например, в работе [8] оценивалась эффективность удаления ветеринарных антибиотиков из сточных вод при обработке последних методом ЭК. В качестве загрязняющих веществ выбраны ампициллин, доксициклин, сульфатиазол и тилозин. В экспериментах определяли токсичность и качественный состав растворов антибиотиков после ЭК. После ЭК концентрация ампициллина, доксициклина, сульфатиазола и тилозина в сточных водах снизилась на $3,6 \pm 3,2\%$, $\sim 100\%$, $3,3 \pm 0,4\%$ и $3,1 \pm 0,3\%$ соответственно. Доксициклин был единственным антибиотиком, который эффективно удалялся из сточных вод во время ЭК. Одновременно часть этого антибиотика подверглась окислительной деградации. В результате этого процесса экологическая токсичность реакционной среды снизилась.

3. Вывод

Вопрос наличия фармацевтических препаратов в сточных водах вызывает большую озабоченность, поскольку фармацевтическая промышленность непрерывно развивается, что приводит к большему объему производства лекарственных средств. Как показывают результаты исследований, метод ЭК может эффективно использоваться для очистки сточных вод от ряда фармацевтических загрязняющих веществ. Исследования направлены на оптимизацию использования метода ЭК путем подбора основных ключевых параметров: плотности тока, подбора материалов электродов, времени обработки и др. Перспективным является использование метода ЭК совместно с другими методами. Также отмечено, что метод ЭК не является универсально-эффективным для всех фармацевтических загрязнителей.

**Список литературы:**

1. Li Z., Yang P. Review on physicochemical, chemical, and biological processes for pharmaceutical wastewater. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, vol. 113, no. 1, pp. 012185-012190.
2. Zaied B. K., Rashid M., Nasrullah M., Zularisam A. W., Pant D., Singh L. A comprehensive review on contaminants removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation process. Science of The Total Environment, 2020, vol. 726., pp. 138095-138017.
3. Ensano B.M.B., Borea L., Naddeo V., Belgiorio V., de Luna M.D.G., Balakrishnan M., Ballesteros Jr. F.C. Applicability of the electrocoagulation process in treating real municipal wastewater containing pharmaceutical active compounds. Journal of hazardous materials, 2019, vol. 361, pp. 367-373.
4. Nariyan E., Aghababaei A., Sillanpää M. Removal of pharmaceutical from water with an electrocoagulation process; effect of various parameters and studies of isotherm and kinetic. Separation and Purification Technology, 2017, vol. 188, pp. 266-281.
5. Khaldi S., Lounici H., Drouiche M., Drouiche N. Treatment of ointment pharmaceutical wastewater by electrocoagulation process. Desalination and Water Treatment, 2017, vol. 71, pp. 152-158.
6. Khadir A., Negarestani M., Motamedi M. Optimization of an electrocoagulation unit for purification of ibuprofen from drinking water: Effect of conditions and linear/non-linear isotherm study. Separation Science and Technology, 2021, vol. 56, no. 8, pp. 1431-1449.
7. Dindaş G.B., Çalışkan Y., Celebi E.E., Tekbaş M., Bektaş N., Yatmaz H.C. Treatment of pharmaceutical wastewater by combination of electrocoagulation, electro-fenton and photocatalytic oxidation processes. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 103777-103784.
8. Baran W., Adamek E., Jajko M., Sobczak A. Removal of veterinary antibiotics from wastewater by electrocoagulation. Chemosphere, 2018, vol. 194, pp. 381-389.