

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ВОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАЗМЫ

Горбунова М. А., магистрант

Научный руководитель Котов Д. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Беларусь

В данной статье рассматривается влияние плазменной обработки воды на ее физико-химические свойства в зависимости от параметров и режимов генерируемой плазмы. Рассматриваются виды плазменной обработки, условия формирования и параметры плазмы, генерируемой при атмосферном давлении.

Ключевые слова: плазма атмосферного давления, диэлектрический барьерный разряд, плазменная обработка воды.

Вода, активированная плазмой (plasma activated water (PAW)), благодаря своей уникальной биохимической активности является перспективной в технологиях пищевой промышленности, сельского хозяйства, экологии и биомедицинских отраслях и может быть потенциальной альтернативой химическим удобрениям. Доказано, что вода, активированная плазмой, эффективна для обеззараживания пищевых продуктов, прорастания семян, улучшения роста растений. Практическая значимость технологии заключается в применении и масштабировании процессов, рассмотренных в исследовании. Экономическая значимость состоит в энерго- и ресурсосбережении, низкой материалоемкости технологии.

Одним из основных применений плазмы в природоохранном секторе является очистка промышленных сточных вод за счёт образования озона, который является сильным окислителем и способен разлагать токсичные материалы. Таким образом, очистка от оксидов азота (NO_x) и серы (SO_2), а также разрушение летучих органических компонентов и удаление тяжёлых металлов являются распространёнными применениями плазмы в этом секторе, где используются как высокоэнергетические электронные пучки, коронные разряды и диэлектрические барьерные разряды (ДБР), так и другие разряды для обработки растворов. С другой стороны, значительный потенциал плазмы в области медицины привёл к созданию нового независимого медицинского направления, называемого «плазменная медицина» или «плазменная биомедицина» [1].

Для конкретного случая модификации свойств воды с помощью электрического разряда дальнейшая оптимизация представляет собой сложную задачу из-за большого разнообразия конструкций и материалов реакторов, типов разрядов и рабочих параметров. Конструкция и материалы

влияют на энергоэффективность, а также рабочие параметры влияют на выходные свойства воды после обработки.

Классификация реакторов на основе используемого режима разряда [2]:

- 1) Коронный
- 2) Тлеющий разряд
- 3) Дуговой разряд
- 4) Диэлектрический барьерный разряд (ДБР)

Коронный разряд, – возникает при резко выраженной неоднородности электрического поля вблизи одного или обоих электродов. Подобные поля формируются у электродов с очень большой кривизной поверхности. Важно отметить, что размеры и движение водной фазы в реакторах этого типа могут существенно влиять на энергоэффективность. Тлеющий разряд характеризуется небольшой силой тока (десятки миллиампер), относительно высоким напряжением (десятки и сотни вольт), низким давлением газа. Дуговой разряд характеризуется большой силой тока (десятки и сотни ампер) и сравнительно небольшим напряжением (несколько десятков вольт). Формированию дугового разряда предшествует короткий нестационарный процесс в пространстве между электродами – разрядном промежутке. Длительность этого процесса (время установления) обычно $\sim 10^{-6}$ - 10^{-4} сек в зависимости от давления и рода газа, длины разрядного промежутка, состояния поверхностей электродов и т.д. Дуговой разряд получают, ионизируя газ в разрядном промежутке. Дуговой разряд может также возникнуть в результате пробоя электрического разрядного промежутка при кратковременном резком повышении напряжения между электродами. Если пробой происходит при давлении газа, близком к атмосферному, то нестационарным процессом, предшествующим дуговому разряду, является искровой разряд. Дуговой разряд может возникать практически при любом давлении газа, от менее 10^{-5} мм рт. ст. до сотен атм. Дуговой разряд может протекать не только при постоянном, но и при переменном напряжении между электродами.

Диэлектрический барьерный разряд (ДБР) – это разряд в газовой среде, заполняющей промежуток между электродами, один или оба из которых покрыты диэлектриком. При приложении к электродам переменного напряжения в газе возникает электрическое поле, определяемое приложенным к электродам напряжением и зарядами на поверхности диэлектрика. Разряд возникает, если напряжение между электродами превышает напряжение пробоя. Системы ДБР различаются конфигурацией электродов (параллельные, копланарные, цилиндрические, пористые электроды), формой сигнала (синусоидальный переменный ток, прямоугольный постоянный ток, треугольный постоянный ток и т. д.) и/или частотой (от 50 Гц до 50 кГц).

Плазма, генерируемая в конфигурации ДБР для обработки воды, составляет 27% систем, описанных в литературе. Широкое применение барьерного разряда в технике обуславливается возможностью возбуждения нестационарной низкотемпературной плазмы при атмосферном давлении, что значительно снижает стоимость технологических процессов с их применением и упрощает их. Также достоинством ДБР по сравнению с другими типами разрядов атмосферного давления является отсутствие прямого деструктивного воздействия на обрабатываемый объект. Применение электрических разрядов низкого и атмосферного давления позволяет в широком диапазоне варьировать параметры плазмы и выбирать оптимальные условия обработки в зависимости от свойств тестируемого материала [1].

Механизмы обработки воды могут быть разделены по принципу работы реактора на три вида [3]:

- 1) разряд в газовой фазе над поверхностью воды (рисунок 1, а);
- 2) разряд в жидкой фазе (рисунок 1, б);
- 3) разряд в многофазных средах или гибридная разрядная система газ/жидкость (рисунок 1, в).

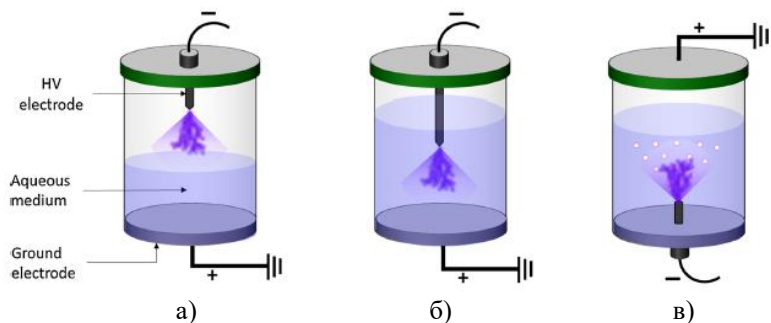


Рисунок 1 – Схематическое изображение различных разрядных систем для обработки воды

Атмосферная плазма генерирует активные формы кислорода и азота (АФК), которые взаимодействуют с водой и встраиваются в неё. Типы и относительная концентрация АФК зависят от метода генерации плазмы и от конкретного используемого газа. Типичные долгоживущие виды могут включать нитриты (NO_2^-), нитраты (NO_3^-), озон (O_3) и пероксид водорода (H_2O_2). Короткоживущие формы, такие как гидроксильные радикалы (OH^\cdot), супероксид-анион-радикал (O_2^-), синглетный кислород ($^1\text{O}_2$), оксид азота (NO) и пероксинитрит (ONOO^\cdot), существуют только в течение короткого промежутка времени с периодом полураспада порядка секунды.

Концентрация активных форм, присутствующих в воде, приводит к образованию раствора с более высоким окислительно-восстановительным потенциалом (ОВП), более низким рН и более высокой проводимостью, чем у необработанной воды, и имеет значительные концентрации кислот, таких как азотная (HNO_3) и азотистая кислота (HNO_2). Синергетические эффекты АФК в воде, активированной плазмой, обуславливают ее биохимические свойства и многочисленные применения.

В исследовании Thirumdas, R. и др. [4] были измерены значения рН (а) и проводимости (б) воды, обработанной плазмой диэлектрического барьерного разряда (рисунок 2). Время обработки – 0 соответствует необработанной деионизированной воде. Значительное снижение рН было обнаружено даже после короткого времени обработки. Например, необработанная деионизированная вода имела начальный рН 6,96, а после 1 минуты плазменной обработки снизилась до 3,85. При более длительном времени обработки рН продолжает снижаться, но медленнее, достигая значений, близких к 3,00. Проводимость же продолжает значительно расти со временем обработки, с максимумом 529 мкСм/см через 30 минут плазменной обработки.

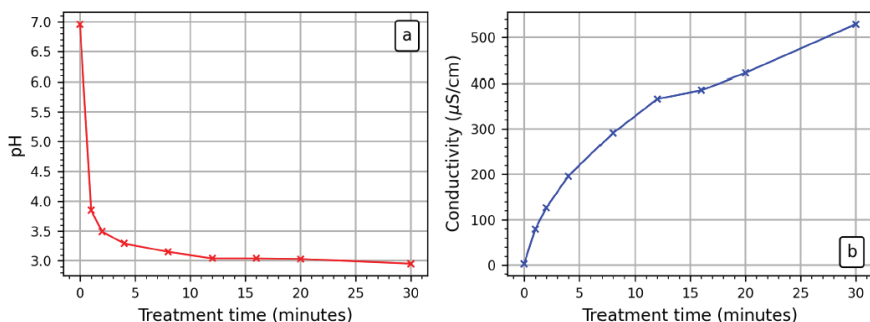


Рисунок 2 – Измеренные значения рН (а) и проводимости (б) обработанных образцов для различного времени обработки

В исследовании Бурмистрова Д. Е. и др. [5] дистиллированная вода подвергалась воздействию холодной атмосферной плазмы (ХАП), создаваемой пьезотрансформатором. Время обработки составляло от 30 сек до 10 мин. Проводилась регистрация спектров поглощения и пропускания после обработки воды ХАП с использованием спектрометра. Поглощение было самым высоким для нитрит-иона (NO_2^-) и нитрат-иона (NO_3^-). Значение рН было получено с помощью рН-метра. Отмечалось увеличение проводимости воды с увеличением времени обработки. Величина рН, снижалась в

зависимости от продолжительности обработки, что связано с накоплением нитрат- и нитрит-анионов в среде, активированной ХАП. Концентрация пероксида водорода увеличивалась в зависимости от продолжительности обработки воды ХАП.

Проведенные исследования [4, 6, 7] показывают, что среды, обработанные холодной плазмой, могут сохранять бактерицидные свойства в течение длительного времени, а также доказывают успешность использования холодной атмосферной плазмы для стерилизации поверхностей, заживления ран, стимуляции иммунитета и др.

Взаимодействие атмосферной плазмы с водой приводит к ряду сложных химических реакций, которые изменяют физико-химические свойства жидкости. рН воды, обработанной плазмой, уменьшается с увеличением времени обработки, в то время как проводимость увеличивается. Поскольку рН является мерой концентрации ионов водорода в растворе, а проводимость – мерой способности раствора проводить электрический ток, эти простые измерения позволяют быстро определить эффективность обработки.

Вода, активированная плазмой, действует как антимикробный агент, а повышенная концентрация азотсодержащих соединений также действует как натуральное удобрение. Таким образом, применение обработки растворов холодной атмосферной плазмой является перспективным решением для биомедицины и фармакологии, является перспективной технологией в пищевой, сельскохозяйственной промышленности.

Литература:

1. Melo, T.F.d Plasma–SalineWater Interaction: A Systematic Review / Melo, T.F.d [et al.] // *Materials*. – 2022. – №15. – 4854 p.
2. Patrick, V. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition / Patrick Vanraes [et al.]. – 2016.
3. Zeghioud, H. Review on discharge Plasma for water treatment: mechanism, reactor geometries, active species and combined processes / Hichem Zeghioud [et al.] // *Journal of Water Process Engineering*. – 2020. – №38.
4. Thirumdas, R. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture / Thirumdas Rohit [et al.] // *Trends in food science & technology* 77. – 2018. – 21-31 p.
5. Бурмистров, Д. Е. Получение и применение воды, обработанной холодной атмосферной плазмой / Д. Е. Бурмистров и др. // *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН*. – 2021. – Москва, Россия.
6. Choi, E. H. Plasma bioscience for medicine, agriculture and hygiene applications / E. H. Choi [et al.] // *Journal of the Korean Physical Society*. – 2022.
7. He, J. Comparing inactivation of Escherichia coli O157:H7 on fresh produce using plasma-activated mist / J. He [et al.] // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2024. – №93.