

**ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ИСКРОВЫМИ РАЗРЯДАМИ  
НА ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ  
СТОЧНЫХ ВОД**

А.А. Белов

**Реферат.** Существует актуальная потребность в надежном, экономичном и экологически безопасном методе обеззараживания и активации воды для устранения микроорганизмов и обогащения питательными веществами, который может эффективно работать в небольших масштабах в рамках полива растений. Цель исследований заключалась в изучении влияния обработки искровыми разрядами на обеззараживание атмосферных сточных вод. Экспериментальные исследования выполнены в 2022 г. в лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы ФНАЦ ВИМ (г. Москва). Используемое оборудование для измерения концентрации бактерий – люминометр EnSURETouch. Объект исследований – атмосферные сточные воды Жулебинского коллектора и Курьяновского канала г. Москвы, образованные в результате выпадения осадком в весеннее время года. Экспериментальная установка содержит повышающий трансформатор ТВИ-50 со встроенным мостовым выпрямителем; батарею двух параллельно соединенных конденсаторов К75-25 по 0,025 мкФ; формирующий и рабочий зазоры, на которых образуется канал искровых разрядов, следующих с частотой 1 Гц при разрядном напряжении 20 кВ; рабочий орган с электродами. Выявлено снижение концентрации бактерий при увеличении продолжительности обработки искровыми разрядами на экспериментальной установке до 5 мин. в атмосферной сточной воде Жулебинского коллектора с 1010 КОЕ/мл до 105 КОЕ/мл, Курьяновского канала – с 109 КОЕ/мл до 104 КОЕ/мл. Для достижения нормы 106 КОЕ/мл воду Жулебинского коллектора необходимо обрабатывать в течение 2 мин, Курьяновского канала – 1,5 мин. Для обеззараживания на 1 log в среднем по всем выбранным образцам воды требуется 0,3 мин.

**Ключевые слова:** активные формы, вода для полива, искровые разряды, концентрация бактерий, растения, ультрафиолетовая обработка, экспериментальная установка.

**Введение.** Для обеззараживания воды применяют такие методы и технологии, как обработка ультрафиолетом, озонирование, хлорирование, солнечный фотокатализ и др. Известные традиционные методы обеззараживания воды имеют определенные недостатки. Несмотря на то, что фильтры эффективно удаляют микроорганизмы, они не способны их инактивировать. Поэтому требуется регулярная замена фильтров. Химические дезинфицирующие средства имеют проблему токсичности. Например, признаются долгосрочные побочные эффекты употребления хлорированной воды. Хлор соединяется с природными веществами в воде с образованием тригалометанов, которые запускают в организме производство свободных радикалов, вызывая повреждение тканей, приводящее к раку и нарушениям репродуктивной функции. Некоторые паразиты устойчивы к большинству таких методов стерилизации, как хлорирование, и они довольно легко могут перемещаться по системе распределения к местам возможного попадания в организм человека. Ультрафиолетовое излучение – эффективный инструмент для стерилизации воды, но общие затраты, включая затраты на электроэнергию, установку и техническое обслуживание, относительно велики [1]. Озон способен инактивировать микроорганизмы в воде на уровне хлора, но при высоких температурах и рН озону требуется больше времени воздействия из-за его быстрого распада. Более того, такие методы трудно использовать в развивающихся странах с разрозненными поселениями и

небольшой численностью проживающих людей [2].

Преимущество обработки воды искровыми разрядами, в отличие от перечисленных и наиболее широко распространенных, заключается в двунаправленном воздействии благодаря высокой реакционной способности искровых разрядов [3]. Кроме обеззараживания, предлагаемый метод позволяет обогащать воду такими питательными веществами, как нитраты, кислород и гидроксиды [4]. Реакционную способность искровых разрядов в основном подтверждает образование активных радикалов, формирование которых происходит по четырехступенчатому механизму [5]. Первый этап включает диссоциацию молекул кислорода, азота и воды ( $O_2$ ,  $N_2$  из воздуха,  $H_2O$  из окружающей влаги и испарения воды) из-за высокоэнергетических ультрафиолетовых фотонов и присутствия третьих тел с высокой энергией (например, электронов) внутри плазменной фазы искровых разрядов. Далее высокоэнергетические продукты диссоциации реагируют между собой, а также с другими атомами и молекулами с образованием промежуточных соединений. После чего эти соединения проталкиваются внутрь воды посредством диффузии и принудительной конвекции (нисходящий поток газа). Наконец, они взаимодействуют с водной фазой, давая различные реакции диссоциации и ассоциации, формируя устойчивые активные формы кислорода и азота.

Следовательно, существует актуальная потребность в надежном, экономичном и

экологически безопасном методе обеззараживания и активации воды для устранения микроорганизмов и обогащения питательными веществами, эффективная реализация которого возможна в небольших масштабах для полива растений.

Цель исследования – изучение влияния обработки искровыми разрядами на обеззараживание атмосферных сточных вод методом обработки воды искровыми разрядами.

**Условия, материалы и методы.** Проведение экспериментальных исследований осуществляли в 2022 г. в лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы ФНАЦ ВИМ (г. Москва). Концентрацию бактерий измеряли люминометром EnSURETouch. Достоверность и обоснованность выбранного метода измерений бактерий люминометром была установлена предыдущими исследованиями [6, 7]. Объект исследований – атмосферные сточные воды Жулебинского коллектора и Курьяновского канала г. Москвы, образованные в результате выпадения осадков в весеннее время года.

Источником высокого напряжения для экспериментальной установки служит повышающий трансформатор ТВИ-50 со встроенным мостовым выпрямителем. Он повышает однофазное переменное напряжение сети 240 В до 20 кВ. Мостовой выпрямитель позволяет выпрямить его до постоянного. Накопителем энергии служит батарея 2-х параллельно соединенных конденсаторов К75-25 по 0,025 мкФ. При повышении напряжения на батарее конденсаторов до 20 кВ происходит самопроизвольный пробой воздушных формирующих зазоров. Вся энергия, запасенная в конденсаторах, мгновенно поступает на рабочий зазор в воде и выделяется в виде короткого электрического импульса большой мощности в рабочем органе. При более высоком напряжении снижается эксплуатационная надежность

установки, при меньшем напряжении увеличивается продолжительность обработки [8]. Обработка воды плазмой искровых разрядов частотой 1 Гц осуществляется в рабочем органе, поэтому материалом для обеспечения прочности и надежности этого наиболее важного компонента установки выбран титан [9]. Максимальная разовая загрузка рабочего органа 2,5 л воды. Его заполняют водой выше уровня электродов, но так, чтобы вверху оставалась воздушная полость для демпфирования ударной волны от канала разряда (чтобы не повредить изоляторы электродов).

Было отобрано по 5 проб атмосферной сточной воды Жулебинского коллектора и Курьяновского канала по 3 повторности. После измерения концентрации бактерий в каждой из 30 проб воды было рассчитаны усредненные значения. Для Жулебинского коллектора исходная концентрация бактерий составляла 1010 КОЕ/мл, для Курьяновского канала – 109 КОЕ/мл. Обеззараживание атмосферных сточных вод искровыми разрядами проводили в течение 1...5 мин.

**Анализ и обсуждение результатов.** Полив атмосферной сточной водой растений, в том числе овощей, невозможен без предварительного обеззараживания. Измерения люминометром EnSURETouch показали снижение концентрации бактерий при увеличении продолжительности обработки до 5 мин в атмосферной сточной воде Жулебинского коллектора до 105 КОЕ/мл, Курьяновского канала – до 104 КОЕ/мл (см. рис. 1).

Концентрация бактерий в поливной воде должна быть не более 106 КОЕ/мл [10]. Для достижения такой нормы воду Жулебинского коллектора необходимо обрабатывать в течение 2 мин., Курьяновского канала – 1,5 мин. Следует отметить, что для обеззараживания на 1 log требуется в среднем по всем выбранным образцам воды 0,3 мин.

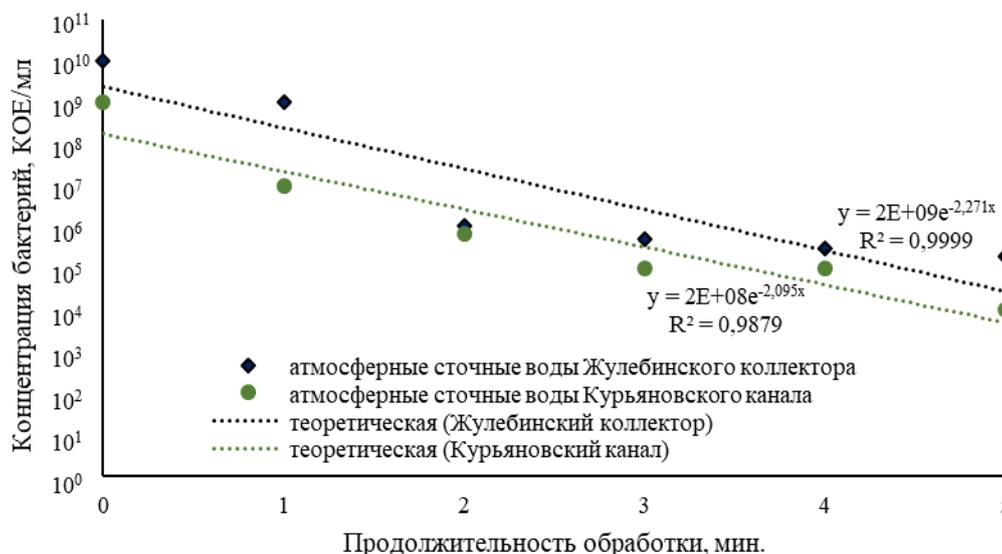


Рис. 1 – Зависимости концентрации бактерий в атмосферных сточных водах от продолжительности обработки искровыми разрядами

Повышение температуры воды может способствовать размножению бактерий в ней. Температуру воды измеряли термодатчиком ломинотра. У контрольных образцов она составляла 14...16 °С, у экспериментальных образцов по мере увеличения продолжительности обработки до 5 мин температура возрастала до 18...20 °С соответственно. Повышение температуры обрабатываемой воды на 1...4 °С не создает благоприятных условий для развития бактерий после обработки.

Факторы, которые играют основную роль в процессе инактивации микроорганизмов в воде при образовании искрового разряда, – генерация сильного ультрафиолетового излучения, электрического поля высокой напряженности, свободных радикалов, ударных волн и металлических наночастиц, образующихся в результате износа материала рабочих электродов. Энергия запасается в канале разрядника в виде ионизации, возбуждения и кинетической энергии случайного движения частиц.

Накопленная энергия удаляется из канала электромагнитным излучением, ударными волнами и теплопроводностью к

блилежащим молекулам воды, поскольку искровой канал излучает свет, расширяется в размерах, а температура внутри канала снижается [11, 12, 13]. В зависимости от типа разряда и общей подводимой энергии около 30% может излучаться в виде ультрафиолетового излучения.

**Выводы.** В результате проведенных исследований выявлено, что при увеличении продолжительности обработки искровыми разрядами на экспериментальной установке до 5 мин, происходит снижение концентрации бактерий в атмосферной сточной воде Жулебинского коллектора до 105 КОЕ/мл, Курьяновского канала – до 104 КОЕ/мл. Для достижения нормы 106 КОЕ/мл эту воду необходимо обрабатывать соответственно 2 мин и 1,5 мин. Для обеззараживания выбранных образцов воды на 1 л необходимо в среднем по 0,3 мин. Основную роль в процессе обеззараживания воды играют такие факторы, как генерация сильного ультрафиолетового излучения, электрического поля высокой напряженности, свободных радикалов, ударных волн и металлических наночастиц, образующихся в результате износа рабочих электродов.

#### Литература

1. Effects of pulsed and continuous wave discharges of underwater plasma on Escherichia coli / S. J. Lee, S. H. Ma, Y. C. Hong, et al. // Separation and Purification Technology. 2018. No. 193. P. 351–357. doi: 10.1016/j.seppur.2017.10.040.
2. Zheng J. Inactivation of Staphylococcus aureus in water by pulsed spark discharge // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. No. 1. 10311. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-10784-2> (дата обращения: 10.05.2022). doi: 10.1038/s41598-017-10784-2
3. Влияние электрогидравлической обработки на содержание нитратного азота в поливной воде / А. А. Белов, А. Н. Васильев, Ю. А. Степаньичевы др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. Т. 15. № 3 (59). С. 54–57.
4. Investigation of physicochemical properties of plasma activated water and its bactericidal efficacy / V. Rathore, D. Patel, S. Butani, et al. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2021. No. 41. P. 871–902. doi: 10.1007/s11090-021-10161-y
5. Plasma activated water (PAW): chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture / R. Thirumdas, A. Kothakota, U. Annapure, et al. // Trends in Food Science and Technology. 2018. 77. P. 21–31. doi: 10.1016/j.tifs.2018.05.007
6. Belov A., Vasilyev A., Musenko A. Application of high-voltage discharges for disinfection and activation of irrigation water // Irrigation and Drainage. 2021. Vol. 70. No. 2. P. 185–194. doi: 10.1002/ird.2535
7. Effect of high-voltage spark discharges on reduction of the concentration of total bacterial count in wastewater / A. Belov, A. Vasilyev, A. Dorokhov, et al. // Journal of Water Process Engineering. 2022. Vol. 45. 102465. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714421005523?via%3Dihub> (дата обращения: 12.05.2022). doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102465
8. Аналитическое обоснование системы автоматического контроля глубины обработки почвы / А. С. Дорохов, А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов и др. // Агроинженерия. 2021. № 3 (103). С. 19–23.
9. Белов А. А. Обоснование параметров и режима работы лабораторной электрогидравлической установки для обеззараживания воды // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13. № 4 (67). С. 167–173.
10. Microbial Hazards in Irrigation Water: Standards, Norms, and Testing to Manage Use of Water in Fresh Produce Primary Production / M. Uyttendaele, L. A. Jaykus, P. Amoah, et al. // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2015. Vol. 14. No. 4. P. 336–356. doi: 10.1111/1541-4337.12133.
11. Effect of pulse rise time on plasma plume propagation velocity / W. Gong, Q. Huang, Z. Wang, et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42. P. 2868–2869. doi: 10.1109/TPS.2014.2323254.
12. Валиев, А. Р. Роль и место орошаемого земледелия в производстве сельскохозяйственной продукции и его экономическая эффективность (опыт Республики Татарстан) / А. Р. Валиев, А. В. Комиссаров, Р. Уллах // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 16. – № 3(63). – С. 160-166.
13. Comparative evaluation of productivity of ryegrass and ryegrass-goatling grass stands affected by different mineral and organomineral nutrition / L. T. Vafina, F. N. Safiollin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: The proceedings of the conference AgroCON-2019, Kurgan, 18–19 апреля 2019 года. – Kurgan: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 012109.

#### Сведения об авторах:

Белов Александр Анатольевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы; e-mail: belalexan85@gmail.com  
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия.

**Abstract.** There is an urgent need for a reliable, economical and environmentally friendly water disinfection and activation method to eliminate micro-organisms in the water and enrich it with nutrients, which can work effectively on a small scale within the scope of watering plants. The purpose of the research is to study the effect of spark discharge treatment on the disinfection of atmospheric wastewater. Experimental studies were carried out in 2022 in the laboratory of electrophysical impact on agricultural objects and materials of the FNAC VIM (Moscow). The bacterial concentration measurement equipment used is the EnSURE Touch Luminometer. The object of research was the atmospheric wastewater of the Zhulebinsky collector and the Kuryanovsky Canal in Moscow, formed as a result of precipitation in the spring season. The experimental setup contains a TVI-50 step-up transformer with a built-in bridge rectifier; a battery of two parallel-connected capacitors K75-25 of 0.025  $\mu\text{F}$  each; forming and working gaps, on which a channel of spark discharges is formed, followed at a frequency of 1 Hz at a discharge voltage of 20 kV; working body with electrodes. As a result of the studies, a decrease in the concentration of bacteria in the atmospheric wastewater of the Zhulebinsky collector to 105 CFU/ml and the Kuryanovsky canal to 104 CFU/ml was revealed with an increase in the duration of treatment with spark discharges in the experimental setup to 5 minutes. To achieve the norm of 106 CFU/ml, the water of the Zhulebinsky collector must be treated for 2 minutes. The water of the Kuryanovsky Canal requires a duration of 1.5 minutes. for disinfection up to the established norm. For disinfection of 1 log, an average of 0.3 min is required for all selected water samples.

**Key words:** active forms, water for irrigation, spark discharges, concentration of bacteria, plants, ultraviolet treatment, experimental setup.

#### References

1. Lee SJ, Ma SH, Hong YC. Effects of pulsed and continuous wave discharges of underwater plasma on *Escherichia coli*. Separation and Purification Technology. 2018; 193. 351-357 p. doi: 10.1016/j.seppur.2017.10.040.
2. Zheng J. Inactivation of *Staphylococcus aureus* in water by pulsed spark discharge. [Internet]. Scientific reports. 2017; 7. 1. 10311. [cited 2022, May 10]. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-10784-2>. doi: 10.1038/s41598-017-10784-2
3. Belov AA, Vasil'ev AN, Stepanychev YuA. [Influence of electrohydraulic treatment on the content of nitrate nitrogen in irrigation water]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; Vol. 15. 3 (59). 54-57 p.
4. Rathore V, Patel D, Butani S. Investigation of physicochemical properties of plasma activated water and its bactericidal efficacy. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2021; 41. 871-902 p. doi: 10.1007/s11090-021-10161-y
5. Thirumdas R, Kothakota A, Annapure U. Plasma activated water (PAW): chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. Trends in food science and technology. 2018; 77. 21-31 p. doi: 10.1016/j.tifs.2018.05.007
6. Belov A, Vasilev A, Musenko A. Application of high-voltage discharges for disinfection and activation of irrigation water. Irrigation and Drainage. 2021; 70. 2. 185-194 p. doi: 10.1002/ird.2535
7. Belov A, Vasilev A, Dorokhov A. Effect of high-voltage spark discharges on reduction of the concentration of total bacterial count in wastewater. [Internet]. Journal of Water Process Engineering. 2022; Vol. 45. 102465. [cited 2022, May 12]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714421005523?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102465
8. Dorokhov AS, Sibirev AV, Aksenov AG. [Analytical substantiation of the system of automatic control of the depth of soil cultivation]. Agroinzheneriya. 2021; 3 (103). 19-23 p.
9. Belov AA. [Substantiation of the parameters and mode of operation of a laboratory electro-hydraulic installation for water disinfection]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; 13. 4 (67). 167-173 p.
10. Uyttendaele M, Jaykus LA, Amoah P. Microbial hazards in irrigation water: standards, norms, and testing to manage use of water in fresh produce primary production. Comprehensive reviews in food science and food safety. 2015; 14. 4. 336-356 p. doi: 10.1111/1541-4337.12133.
11. Gong W, Huang Q, Wang Z. Effect of pulse rise time on plasma plume propagation velocity. IEEE Transactions on plasma science. 2014; 42. 2868-2869 p. doi: 10.1109/TPS.2014.2323254.
12. Valiev, A.R. The role and place of irrigated agriculture in the production of agricultural products and its economic efficiency (experience of the Republic of Tatarstan) / A.R. Valiev A.V. Komissarov, R. Ullah // Bulletin of the Kazan State Agrarian University. – 2021. – T. 16. – № 3(63). – Pp. 160-166.
13. Comparative evaluation of productivity of ryegrass and ryegrass-goatling grass stands affected by different mineral and organomineral nutrition / L.T. Vafina, F.N. Safiollin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: The proceedings of the conference AgroCON-2019, Kurgan, 18–19 апреля 2019 года. – Kurgan: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 012109.

#### Authors:

Belov Aleksandr Anatolevich - Doctor of Technical sciences, chief researcher of the Laboratory of Electrophysical Influence on Agricultural Objects and Materials; e-mail: belalexan85@gmail.com  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.