

---

---

### 4.3.2. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 621.311

DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2024\_2\_107

EDN: FCHQNK

#### Применение технологии холодной атмосферной плазмы для обработки атмосферных сточных вод с целью повторного использования в сельском хозяйстве

Александр Анатольевич Белов<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

<sup>1</sup> belalexan85@gmail.com✉

**Аннотация.** В связи с дефицитом в мире пресной воды разрабатываются и применяются различные способы обеззараживания, в частности атмосферных сточных вод с целью их повторного использования, в том числе в сельском хозяйстве. Большинство известных способов обеззараживания воды не насыщают ее питательными элементами. Технология холодной атмосферной плазмы активирует воду, однако влияние плазменно-активированных сточных вод на сельскохозяйственные культуры остается недостаточно изученным. Обработка сточных вод проводилась плазмой искровых разрядов на разработанной экспериментальной установке, новизна которой заключается в наличии двух формирующих промежутков для увеличения крутизны фронта импульсов, повышения симметрии и управляемости схемы и предотвращения колебательных процессов. Параметры установки были следующие: напряжение – 20 кВ, конденсаторы – 0,025 мкФ, частота разряда – 1 Гц, одиночная загрузка – 2,5 л, рабочий зазор – 1 мм, формирующие зазоры – 5 мм. Был поставлен полевой эксперимент по выращиванию редиса в открытом грунте при орошении активированными плазмой водами (АПВ) Жулебинского коллектора и Курьяновского канала в сравнении с водами, обработанными УФ-излучением. Концентрация бактерий в воде всех вариантов составляла 10<sup>6</sup> КОЕ/мл, содержание нитратов находилось в пределах от 6,3 до 10,0 мг/л в зависимости от варианта. Средняя сырая масса корнеплодов редиса с делянки при поливе АПВ Жулебинского коллектора была на 17% выше, чем при поливе водой, обработанной УФ-излучением. Средняя сырая масса стеблей с листьями составила 27%. Наибольшая общая и средняя сырая масса редиса отмечена на делянке при поливе АПВ Курьяновского канала. По сравнению с поливом водой Жулебинского коллектора прибавка средней сырой массы корнеплодов редиса составила 10%, по сравнению с поливом водой, обработанной УФ-излучением, – 28%. Повторное использование плазменно-активированных сточных вод при поливе не оказывает отрицательного влияния на рост редиса, способствует экономии пресной воды и повышению урожайности.

**Ключевые слова:** атмосферные сточные воды, обеззараживание, технология холодной атмосферной плазмы, УФ-излучение, тест-культура – редис, насыщение питательными элементами

**Для цитирования:** Белов А.А. Применение технологии холодной атмосферной плазмы для обработки атмосферных сточных вод с целью повторного использования в сельском хозяйстве // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17, № 2(81). С. 107–116. [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2024\\_2\\_107-116](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_2_107-116).

### 4.3.2. ELECTROTECHICS, ELECTRICAL EQUIPMENT AND ELECTRICAL POWER SUPPLY FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

#### Cold atmospheric plasma technology application at atmospheric wastewater treatment for the purpose of their reusing in agriculture

Aleksandr A. Belov<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

<sup>1</sup> belalexan85@gmail.com✉

**Abstract.** Due to the shortage of fresh water, various methods of disinfection, in particular of atmospheric wastewater, are being developed and applied for the purpose of their reuse, for example in agriculture. Most known methods of water disinfection do not saturate it with nutrients. Cold atmospheric plasma technology activates water, but the effects of plasma-activated wastewater on crops remain poorly understood. Wastewater treatment was carried out with spark discharge plasma on a developed experimental installation, the novelty of which lies in two forming gaps to increase the steepness of the pulse front, increase the symmetry and controllability of the circuit and

prevent oscillatory processes. The installation parameters were as follows: voltage – 20 kV, capacitors – 0.025  $\mu$ F, discharge frequency – 1 Hz, single load – 2.5 l, working gap – 1 mm, forming gaps – 5 mm. A field experiment was conducted on growing garden radish in open ground under irrigation with plasma activated waters (PAW) of the Zhulebinsky collector and the Kuryanovsky canal in comparison with waters treated with UV radiation. The concentration of bacteria in the water of all options was  $10^6$  CFU/ml, the nitrate content in the water ranged from 6.3 to 10.0 mg/l, depending on the option. The average fresh weight of radish roots at the variant irrigated with the PAW of the Zhulebinsky collector was 17% higher than at the variant irrigated with the water treated with UV radiation. The average fresh weight of stems with leaves was 27%. The highest total and average wet weight of radish was noted at the variant irrigated with the PAW of the Kuryanovsky Canal. Compared to irrigation with water from the Zhulebinsky collector, the increase in the average fresh weight of radish was 10%, compared to irrigation with water treated with UV radiation – 28%. Reuse of plasma-activated wastewater for irrigation does not exert any negative effect on the growth of radish and helps to save water.

**Keywords:** atmospheric wastewater, disinfection, cold atmospheric plasma technology, UV radiation, test culture, radish, saturation with nutrients

**For citation:** Belov A.A. Cold atmospheric plasma technology application at atmospheric wastewater treatment for the purpose of their reusing in agriculture. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024;17(2):107-116. (In Russ.). [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2024\\_2\\_107-116](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_2_107-116).

## Введение

Трудно представить бытовую, промышленную и сельскохозяйственную деятельность человека без пресной воды. Однако в некоторых странах мира и во многих регионах России ощущается ее острая нехватка, что считается одной из глобальных проблем современности. По данным Всемирной организации здравоохранения, около 28% населения земного шара не имеют возможности удовлетворить свои банальные потребности в чистой питьевой воде [21].

Водные ресурсы на нашей планете считаются ограниченными, но, к счастью, возобновляемыми по своей природе. Однако из-за промышленного загрязнения и эвтрофикации водоемов запасы чистой пресной воды постоянно сокращаются, поэтому требуют бережного и экономного использования. Одним из способов снижения количества потребляемой воды является ее повторное использование для различных целей.

Известна технология бытового повторного использования пресной воды после очистки и обеззараживания для смыва туалетов [16]. При промышленном производстве напитков, в основном за счет мытья бутылок, образуются значительные объемы сточных вод, которые также могут быть использованы повторно [19]. Повторное использование воды особенно важно в засушливых регионах. В африканских странах сточные воды широко используются для орошения ландшафтов [10].

В результате выпадения осадков и снеготаяния образуются атмосферные сточные воды, которые используются в сельском хозяйстве для полива растений. В условиях ухода за почвой и посевами для предотвращения болезней растений такую воду необходимо обеззараживать перед поливом, для чего разрабатывают различные методы [15].

Извлечение чистой воды из загрязненных объемных водоисточников путем сорбционного сбора паров воды является одной из перспективных экологически безопасных, но еще малоизученных и редко применяемых технологий.

Снижение содержания органических загрязнителей в сточных водах может быть достигнуто обработкой их водорослями [4]. Однако этот способ очистки воды необходимо дополнить последующим микробным обеззараживанием [20].

Солнечная фотокаталитическая технология используется для очистки воды от инсектицидов и микроорганизмов для повторного использования [11]. Такая технология имеет ярко выраженную зависимость от наличия солнечной радиации, доступность которой в некоторых районах ограничена [8].

Биофильтры применяются в высокоэффективных технологиях очистки сточных вод с органическими отходами [6]. Однако ее новизна делает эту технологию дорогой с точки зрения эксплуатационных и финансовых затрат.

Наиболее экономичный способ обеззараживания воды хлорированием используется уже очень давно. Недостатком является образование побочных продуктов [14].

Озонирование обладает высоким бактерицидным свойством, нейтрализует почти 95% антибиотиков [7]. В процессе обеззараживания воды озоном образуется небольшое количество побочных продуктов, однако внедрение озонирования предполагает большие капиталовложения.

Ультрафиолетовое облучение требует умеренных эксплуатационных расходов и низких капиталовложений. Ультрафиолет обладает высокой степенью бактерицидного действия и практически не имеет побочных эффектов [9]. Однако обработка ультрафиолетом не позволяет активизировать полезные элементы в воде и насытить или обогатить воду питательными веществами.

Относительно новым методом обеззараживания является обработка воды плазмой электроискровых разрядов. Были проведены различные исследования воздействия плазменно-активированной воды на овощные, зерновые и травяные культуры. Опыты по выращиванию салата-латука при орошении водопроводной водой, обработанной плазмой, показали улучшение его физиологических показателей и отчетливое увеличение массы и объема листьев [13].

Нанесение обработанной плазмой воды на листья картофеля в период вегетативного роста обеспечивает повышение урожайности клубней [17].

Активация прорастания семян гороха, кукурузы, риса и других культур возможна за счет их смачиваемости плазменно-активированной водой [18].

Однако для широкого внедрения плазменного метода обработки поливной воды в сельском хозяйстве этих отдельных лабораторных опытов явно недостаточно.

Учитывая вышеизложенное, сформировалась научная гипотеза о том, что сточные воды не являются отходами, а после обработки плазмой искрового разряда становятся регенеративным ресурсом пресной поливной воды и источником питательных веществ для различных сельскохозяйственных культур, в частности овощных.

Основной целью представленного исследования являлось изучение влияния активированной плазмой атмосферных сточных вод на рост редиса.

### **Материалы и методы**

В ходе проведения исследования применялись различные научные методы, в частности методы анализа и расчета технических средств, систем управления и безопасности эксплуатации высоковольтных электротехнологических установок сельскохозяйственного назначения.

Пробы атмосферных сточных вод отбирались в летний период из Жулебинского коллектора и Курьяновского канала г. Москвы, расположенных на расстоянии 12 км друг от друга.

Определение количества нитратов в сточных водах проводили иономером (ИТАН рН-метр/иономер) с электродом ЭЛИС-121NO<sub>3</sub> методом прямой потенциометрии с точностью ±5% в соответствии с РД 52.24.367-2010.

Концентрацию бактерий в сточных водах измеряли люминометром EnSURE Touch по инструкции M980099 с точностью ±7%.

Качество оросительной воды оценивали на соответствие гигиеническим нормативам согласно нормам технологического проектирования НТП 10-95.

Сырую массу редиса измеряли с помощью весогабаритного измерителя ViBRATM-561E с точностью ±5%. Высоту розетки, а также диаметр корнеплодов редиса измеряли с помощью цифрового штангенциркуля Inforce 06-11-40 с точностью ±6%.

### Результаты и их обсуждение

Разработана экспериментальная установка для выполнения исследований, генерирующая высокое напряжение при периодическом разряде и заряде конденсаторов. Разряд накапливаемой энергии осуществляется синхронно в рабочем искровом промежутке и формирующих зазорах [2].

Обработка сточных вод проводилась плазмой искровых разрядов на разработанной экспериментальной установке, отличительной особенностью которой является наличие двух формирующих зазоров для увеличения крутизны фронта импульсов, повышения симметрии и управляемости схемы и предотвращения колебательных процессов [3]. Преимущества такой схемы заключаются в следующем:

1) возможность накопления дозированного количества энергии с ее импульсной подачей затем в рабочий зазор;

2) значительное сокращение длительности импульса, предотвращение колебательных процессов, способствующих созданию практически одного мощного, очень кратковременного импульса при каждом цикле заряда и разряда:

3) создание крутого фронта импульса, исключающего возможность перехода в дуговой разряд;

4) получение для заданного рабочего промежутка любых из допустимых для данной экспериментальной установки значений тока и напряжения;

5) возможность изменения формы импульса и характера разряда в рабочем промежутке путем симметричного или асимметричного регулирования формирующих промежутков;

6) повышение степени управляемости схемы;

7) выстраивание последовательности пробоя зазоров, при которой сначала прорывается формирующий зазор, а затем рабочий зазор при выделении на нем наибольшей доли энергии.

Параметры установки были следующие:

- напряжение – 20 кВ;
- конденсаторы – 0,025 мкФ;
- частота разряда – 1 Гц;
- одиночная загрузка – 2,5 л;
- рабочий зазор – 1 мм;
- формирующие зазоры – 5 мм.

Рабочий зазор выполнен по схеме шип-диск. Формирующие зазоры выполнены на алюминиевых шарах диаметром 80 мм. Наконечник положительного электрода площадью 2 мм<sup>2</sup> выполнен в виде шипа. Острие отрицательного электрода площадью 500 мм<sup>2</sup> представляет собой диск.

Экспериментальная установка проста в обслуживании, ремонте, сборке и разборке. Компоненты установки размещены в камере, состоящей из двух отсеков. Трансформатор с выпрямителем, вентилятор охлаждения, ограничительный резистор, конденсаторы, первый формообразующий разрядник и система управления размещены в одном отсеке. В другом отсеке находятся второй формообразующий зазор, рабочий зазор и исполнительное устройство.

Для защиты от шума искровых разрядов стенки камеры толщиной 100 мм выполнены звуконепропускаемыми с диэлектрическим заполнением. Для защиты от действия тока и напряжения металлический корпус камеры и ее электрооборудование подключаются к контуру заземления.

Вентилятор УВ-360 для охлаждения трансформатора включается при его непрерывной работе более 1 часа.

Ограничительное сопротивление предназначено для снятия остаточного напряжения с конденсаторов после окончания работы.

На рисунке 1 представлен общий вид экспериментальной установки для обработки сточных вод плазмой искровых разрядов.



**Рис. 1.** Общий вид экспериментальной установки для обработки атмосферных сточных вод плазмой искровых разрядов: 1 – вентилятор; 2 – сопротивление; 3 – система управления; 4 – трансформатор; 5 – конденсаторы; 6 – исполнительное устройство; 7 – разрядники

Система управления состоит из коммутационного устройства включения предельного сопротивления, рукоятки изменения первого образующего промежутка, блока автоматических выключателей, регулировки напряжения автотрансформатором SK2.1LTR0500 и контроля тока амперметром EONE ET201.

В ранее проведенных исследованиях было установлено, что обработка искровыми разрядами сточной воды позволяет увеличивать содержание нитратов и снижать ее бактериальную загрязненность [12], причем расходуемая удельная энергия (Дж/л) меньше, чем при ультрафиолетовом облучении. Приняв во внимание вышеприведенное свойство, автор выдвинул научное предположение о возможном положительном эффекте использования обработанной сточной воды при поливе овощных культур [1].

Для проверки научной гипотезы был поставлен полевой эксперимент по выращиванию редиса в открытом грунте с применением для орошения плазменно-активированных сточных вод.

Редис сорта Жара был выбран в качестве тест-культуры из-за его короткого вегетационного периода для проведения ускоренных экспериментов. Редис высевали в

суглинистую почву на трех делянках площадью по 0,6 м<sup>2</sup>, в количестве 150 семян в 6 рядов на каждой делянке. Расстояние между рядами составляло 40 мм. В соответствии с существующими нормами орошения (Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО) – 10 л/м<sup>2</sup>) каждую делянку непосредственно перед посевом поливали 1 л сточной воды, обработанной разными способами.

Первая делянка (УФ) поливалась сточными водами Жулебинского коллектора после обработки УФ-излучением. Концентрация бактерий в воде снижалась с 10<sup>10</sup> КОЕ/мл до 10<sup>6</sup> КОЕ/мл (норматив ФАО), количество нитратов до и после ультрафиолетовой обработки было неизменным – 6,3 мг/л.

Вторая делянка (ЖК) поливалась плазменно-активированными сточными водами Жулебинского коллектора. Оптимальная продолжительность плазменной обработки воды искровыми разрядами была выбрана равной 2 мин. За это время концентрация бактерий в сточной воде Жулебинского коллектора снижалась с 10<sup>10</sup> КОЕ/мл до норматива ФАО – 10<sup>6</sup> КОЕ/мл, а содержание нитратов повышалось с 6,3 мг/л до 10 мг/л (норматив ФАО).

Третья делянка (КК) поливалась плазменно-активированной водой Курьяновского канала. При обработке воды Курьяновского канала необходимая минимальная продолжительность для соблюдения норматива обеззараживания, то есть снижения начальной концентрации бактерий с 10<sup>9</sup> КОЕ/мл до 10<sup>6</sup> КОЕ/мл, составляла менее 2 мин. Однако в данном случае содержание нитратов не поднималось выше 6 мг/л, поэтому с учетом обоих факторов влияния было выбрано оптимальное время обработки – 3 мин. За это время содержание нитратов повышалось с 4,4 мг/л до норматива ФАО – 10 мг/л. Недостатком в этом случае будет снижение производительности и увеличение затрат. Преимуществом дальнейшего снижения концентрации бактерий может быть увеличение срока хранения такой воды.

После посева каждую делянку поливали 1 л обеззараженной воды ежедневно в вечернее время в течение всего вегетационного периода. Через 4 дня после посева число взошедших семян было следующим: на 1-й, 2-й и 3-й делянках – соответственно 69, 79 и 104 шт.

Через 10 дней после посева на варианте УФ было 126 проросших семян, на ЖК – 133, на КК варианте – 139. Было проведено прореживание 20 побегов, выявившее незначительные отличия биометрических показателей редиса по вариантам опыта. Отмечено увеличение диаметра корнеплодов редиса до 15 и 16 мм соответственно на 2-й и 3-й делянках при 11 мм на 1-й. На вариантах ЖК и КК высота розетки увеличилась соответственно на 10 и 30% по сравнению с вариантом УФ.

Прореженные побеги редиса взвешивали. Сырая масса 20 побегов на варианте УФ составила 120 г, ЖК – 160 г и КК – 180 г. Средняя сырая масса одного корнеплода редиса на варианте УФ составила 6 г, на вариантах ЖК и КК – соответственно 8 и 9 г. Прибавка средней сырой массы на варианте ЖК по сравнению с УФ составила 33%, на варианте КК по сравнению с УФ – 50% и на варианте КК по сравнению с ЖК – 13%.

Средняя площадь листа побегов редиса на 1-й делянке составила 129 мм<sup>2</sup>, на 2-й – 156 мм<sup>2</sup>, на третьей – 175 мм<sup>2</sup>. Площадь листьев редиса на 2-й и 3-й делянках была больше соответственно на 21 и 35% по сравнению с 1-й.

В ходе проведения эксперимента измеряли площадь листьев, высоту розетки, диаметр корнеплодов и сырую массу редиса через 10, 16 и 20 дней после посева по вариантам опыта. Результаты измерений биометрических показателей роста редиса представлены на рисунках 2 и 3.

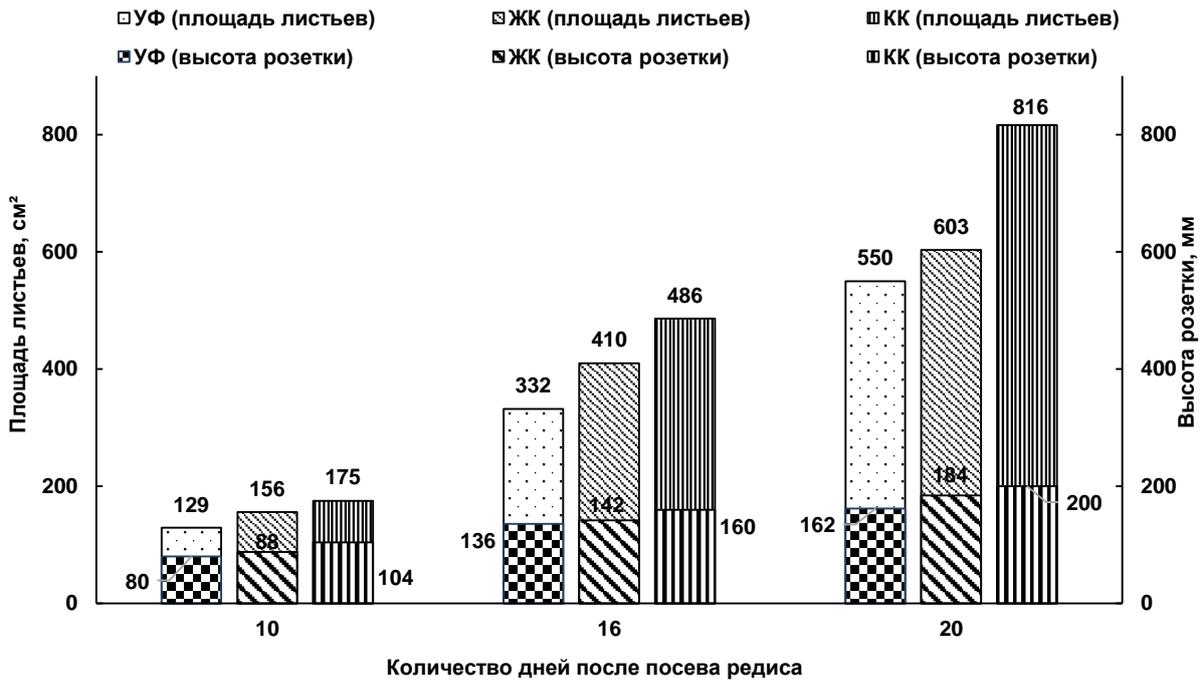


Рис. 2. Площадь листьев и высота розетки редиса через 10, 16, 20 дней после посадки при поливе очищенными сточными водами по вариантам опыта

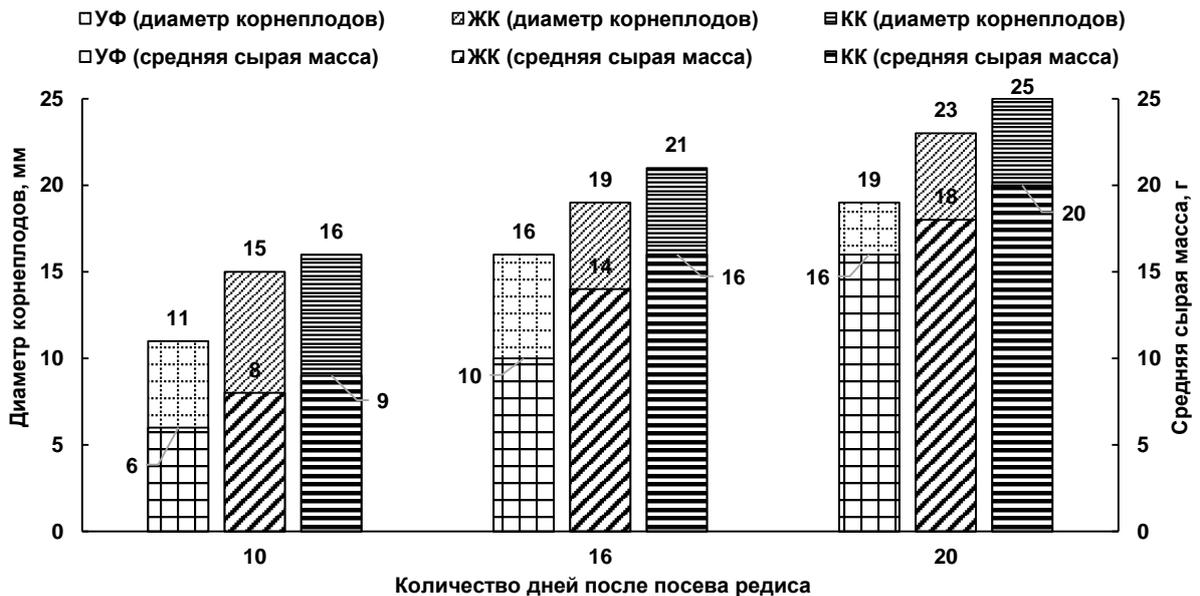


Рис. 3. Диаметр корнеплодов и средняя сырая масса редиса через 10, 16, 20 дней после посева при поливе очищенными сточными водами по вариантам опыта

Таким образом, по результатам измерений через 10, 16 и 20 дней наибольший прирост площади листьев, высоты розетки, диаметра корнеплодов и сырой массы редиса отмечен на варианте КК.

Сбор урожая был проведен через 24 дня после посева. Редис с каждой делянки соответствовал нормативным требованиям на редис по внешнему виду, состоянию мякоти, запаху, вкусу [5]. Были измерены такие показатели, как количество всходов и сырая масса редиса (см. табл.).

## Количество всходов и масса редиса по вариантам опыта

Показатель	Первая делянка (УФ)	Вторая делянка (ЖК)	Третья делянка (КК)
Количество всходов редиса, шт.	126	133	139
Общая сырая масса редиса, г	3654	4655	5143
Сырая масса стеблей с листьями, г	1386	1862	1946
Сырая масса корнеплодов, г	2268	2793	3197
Средняя сырая масса редиса, г	29	35	37
Средняя сырая масса стеблей с листьями, г	11	14	14
Средняя сырая масса корнеплодов, г	18	21	23

Учитывая тот факт, что на 2-й и 3-й делянках количество всходов редиса было больше, чем на 1-й, соответственно на 6 и 10% при равном количестве высеянных семян, при сравнении использовали средние значения показателей роста и развития тест-культуры.

Увеличение средней сырой массы корнеплодов редиса варианта ЖК по сравнению с УФ составило 17%. При этом увеличение средней сырой массы стеблей с листьями составило 27%. Прибавка средней сырой массы редиса на варианте ЖК по сравнению с УФ составила 21%. Орошение плазменно-активированными сточными водами Жулебинского коллектора в большей степени стимулировало рост стеблей и листьев, чем корнеплодов.

Самые высокие значения общей и средней сырой массы редиса отмечены на варианте КК, что связано с более высоким содержанием нитратов. По сравнению с вариантом ЖК прибавка средней сырой массы редиса составила 10%, по сравнению с УФ – 28%. Орошение плазменно-активированными сточными водами Курьяновского канала значительно активизирует рост корнеплодов, стеблей и листьев тест-культуры.

### Выводы

Результаты исследования показали положительное влияние сточных вод, активированных холодной атмосферной плазмой, на рост редиса.

Зафиксирован более существенный рост средней массы корнеплодов при выращивании редиса на варианте, почву которого увлажняли атмосферной сточной водой, обработанной по предлагаемому методу.

Таким образом, подтверждается выдвинутая перед проведением эксперимента научная гипотеза.

Плазменно-активированные сточные воды можно рекомендовать повторно использовать в сельском хозяйстве при поливе овощных культур не только с целью экономии ресурсов пресной воды, но и повышения урожайности.

### Список источников

1. Белов А.А. Влияние обработки искровыми разрядами на обеззараживание атмосферных сточных вод // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17, № 3(67). С. 64–67. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-64-67.
2. Белов А.А. Влияние полива водой после обработки искровыми разрядами на рост и развитие редиса // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 21–25. DOI: 10.28983/asj.y2023i10pp21-25.
3. 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. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.4.167.
4. Вайшля О.Б., Кулятов Д.В. Перспективные виды микроводорослей для биодegradации поллютантов водных экосистем юга западной Сибири // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 1-4. С. 787–789.

5. ГОСТ 34216-2017. Редис свежий. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2018. 8 с.
6. Дорохов А.С., Ковалев Д.А., Федотов А.В. Эффективность анаэробной переработки органических отходов в биофильтрах с использованием кондуктивного носителя // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68, № 1(42). С. 86–92. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-86-92.
7. Селюков А.В., Семенов М.Ю. Доочистка биологически очищенных городских сточных вод озонированием // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2022. № 2. С. 41–45. DOI: 10.35776/VST.2022.02.06.
8. Трунов С.С., Хименко А.В., Тихомиров Д.А. и др. Установка электроснабжения удаленных объектов с солнечным термоэлектрическим генератором // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70, № 3(52). С. 48–55. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-3-48-55.
9. Юферев Л.Ю. Применение энергосберегающего ультрафиолетового электрооборудования в сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16, № 2. С. 69–75. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-69-75.
10. Adewumi J.R., Ilemobade A.A., van Zyl J.E. Treated wastewater reuse in South Africa.pdf (520.32 KB): Overview, potential and challenges // *Resources Conservation and Recycling*. 2010. Vol. 15(2). Pp. 225–247. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.09.012.
11. Aliste M., Garrido I., Hernández V. et al. Assessment of reclaimed agro-wastewater polluted with insecticide residues for irrigation of growing lettuce (*Lactuca sativa* L.) using solar photocatalytic technology // *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 292(PtA). Article no. 118367. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118367.
12. Belov A., Vasilyev A., Dorokhov A. et al. Effect of high-voltage spark discharges on reduction of the concentration of total bacterial count in wastewater // *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 45. Article no. 102465. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102465.
13. Kucerova K., Henselova M., Slovakova L. et al. Effect of plasma activated water, hydrogen peroxide, and nitrates on lettuce growth and its physiological parameters // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(5). Article no. 1985. DOI: 10.3390/app11051985.
14. Li C., Lin Q., Dong F. et al. Formation of iodinated trihalomethanes during chlorination of amino acid in waters // *Chemosphere*. 2019. Vol. 217. Pp. 355–363. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.190.
15. Norton-Brandao D., Scherrenberg S.M., van Lier J.B. Reclamation of used urban waters for irrigation purposes: A review of treatment technologies // *Journal of Environmental Management*. 2013. Vol. 122. Pp. 85–98. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.03.012.
16. Priya A., Rekha P., Kumar P.S. et al. The war using microbes: A sustainable approach for wastewater management // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 275. Article no. 116598. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116598.
17. Rashid M., Rashid M.M., Alam M.S. et al. Stimulating effects of plasma activated water on growth, biochemical activity, nutritional composition and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2022. Vol. 42. Pp. 131–145. DOI: 10.1007/s11090-021-10216-0.
18. Rathore V., Tiwari B.S., Nema S.K. Treatment of pea seeds with plasma activated water to enhance germination, plant growth, and plant composition // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2022. Vol. 42. Pp. 109–129. DOI: 10.1007/s11090-021-10211-5.
19. Sheldon M.S., Mkhize I. Multi-stage EGSB/MBR treatment of soft drink industry wastewater // *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 285. Pp. 368–377. DOI: 10.1016/j.cej.2015.10.021.
20. Vincent F., Rao T.S., Kumar R. et al. Exploring the effects of organic loading rate and domestic wastewater treatment by algal-bacterial granules under natural daylight conditions // *Water Environment Research*. 2023. Vol. 95(1). Article no. 10831. DOI: 10.1002/wer.10831.
21. World Health Organization: Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender. New York: WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene. 2023. 173 p. URL: <https://www.who.int/publications/m/item/progress-on-household-drinking-water--sanitation-and-hygiene-2000-2022>.

## References

1. Belov A.A. Effect of spark treatment for disinfection of atmospheric waste water. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2022;17(3):64-67. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-64-67. (In Russ.).
2. Belov A.A. The effect of irrigation with water after spark discharge treatment on the growth and development of radish. *Agrarian Scientific Journal*. 2023;10:21-25. DOI: 10.28983/asj.y2023i10pp21-25. (In Russ.).
3. Belov A.A. Substantiation of parameters and operating mode of electrohydraulic laboratory set for water decontamination. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020;13(4):167-173. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.4.167. (In Russ.).
4. Vayshlya O.B., Kulyatov D.V. Promising species of microalgae for the biodegradation of pollutants in aquatic ecosystems in the south of Western Siberia. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(1–4):787-789. (In Russ.).
5. ГОСТ 34216-2017. Fresh garden radish. Specifications. Moscow: Standartinform, 2018. 8 p. (In Russ.).

6. Dorokhov A.S., Kovalev D.A., Fedotov A.V. Efficiency of anaerobic processing of organic waste in bio-filters using a conductive. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2021;68(1):86-92. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-86-92. (In Russ.).
7. Seliukov A., Semenov M. Tertiary treatment by ozonation of municipal wastewater after biological treatment. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2022;2:41-45. DOI: 10.35776/VST.2022.02.06. (In Russ.).
8. Trunov S.S., Khimenko A.V., Tikhomirov D.A. et al. Power supply installation for remote rural settlements with solar thermoelectric generator. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2023;70(3):48-55. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-3-48-55. (In Russ.).
9. Yuferev L.Yu. The use of energy-saving ultraviolet electrical equipment in agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(2):69-75. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-69-75. (In Russ.).
10. Adewumi J.R., Ilemobade A.A., Van Zyl, J.E. Treated wastewater reuse in South Africa.pdf (520.32 KB): Overview, potential and challenges. *Resources Conservation and Recycling*. 2010;15(2):225-247. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.09.012.
11. Aliste M., Garrido I., Hernández V. et al. Assessment of reclaimed agro-wastewater polluted with insecticide residues for irrigation of growing lettuce (*Lactuca sativa* L.) using solar photocatalytic technology. *Environmental Pollution*. 2022;292(PtA):118367. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118367.
12. Belov A., Vasilyev A., Dorokhov A. et al. Effect of high-voltage spark discharges on reduction of the concentration of total bacterial count in wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 2022;45:102465. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102465.
13. Kucerova K., Henselova M., Slovakova L. et al. Effect of plasma activated water, hydrogen peroxide, and nitrates on lettuce growth and its physiological parameters. *Applied Sciences*. 2021;11(5):1985. DOI: 10.3390/app11051985.
14. Li C., Lin Q., Dong F. et al. Formation of iodinated trihalomethanes during chlorination of amino acid in waters. *Chemosphere*. 2019;217:355-363. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.190.
15. Norton-Brandao D., Scherrenberg S.M., van Lier J.B. Reclamation of used urban waters for irrigation purposes - A review of treatment technologies. *Journal of Environmental Management*. 2013;122:85-98. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.03.012.
16. Priya A., Rekha P., Kumar P.S. et al. The war using microbes: A sustainable approach for wastewater management. *Environmental Pollution*. 2021;275:116598. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116598.
17. Rashid M., Rashid M.M., Alam M.S. et al. Stimulating effects of plasma activated water on growth, biochemical activity, nutritional composition and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2022;42:131-145. DOI: 10.1007/s11090-021-10216-0.
18. Rathore V., Tiwari B.S., Nema S.K. Treatment of pea seeds with plasma activated water to enhance germination, plant growth, and plant composition. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2022;42:109-129. DOI: 10.1007/s11090-021-10211-5.
19. Sheldon M.S., Mkhize I. Multi-stage EGSB/MBR treatment of soft drink industry wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2016;285:368-377. DOI: 10.1016/j.cej.2015.10.021.
20. Vincent F., Rao T.S., Kumar R. et al. Exploring the effects of organic loading rate and domestic wastewater treatment by algal-bacterial granules under natural daylight conditions. *Water Environment Research*. 2023;95(1):e10831. DOI: 10.1002/wer.10831.
21. World Health Organization: Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender. New York: WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene. 2023. 173 p. URL: <https://www.who.int/publications/m/item/progress-on-household-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2000-2022>.

### Информация об авторе

A.A. Белов – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», belalexan85@gmail.com.

### Information about the author

A.A. Belov, Doctor of Engineering Sciences, Chief Research Scientist, Electrophysical Impact on Agricultural Objects and Materials Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, belalexan85@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 30.04.2024; одобрена после рецензирования 03.06.2024; принята к публикации 05.06.2024.

The article was submitted 30.04.2024; approved after reviewing 03.06.2024; accepted for publication 05.06.2024.

© Белов А.А., 2024