

Тип статьи: научная  
УДК 631.67.03:546.214  
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-4-7-16

## СНИЖЕНИЕ ЖЁСТКОСТИ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ОЗОНИРОВАНИЕМ

*Иван Васильевич Баскаков*<sup>1</sup>, *Владимир Иванович Оробинский*<sup>2</sup>,  
*Аркадий Васильевич Химченко*<sup>3</sup>, *Голубенко Дмитрий Александрович*<sup>4</sup>,  
*Ольга Васильевна Чернова*<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,  
г. Воронеж, Российская Федерация

<sup>5</sup> МБОУ Панинская СОШ, п.г.т. Панино Панинского района Воронежской области,  
Российская Федерация

<sup>1</sup> vasich2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6041-5943>

<sup>2</sup> main@agroeng.vsau.ru,

<sup>3</sup> himch.arkady@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>

<sup>4</sup> dimagolubenko2001@gmail.com

<sup>5</sup> chernovaol2012@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Иван Васильевич Баскаков, vasich2@yandex.ru  
Corresponding author: Ivan Baskakov, vasich2@yandex.ru

**Реферат.** Исследования по влиянию озонной обработки на жесткость оросительной воды приведены в статье. Влияние жесткой воды на рост и развития растений проанализированы. Выявлено, что чрезмерное содержание в оросительной воде ионов магния и кальция, приводит к угнетению сельскохозяйственных культур и снижению их урожайности. Для проведения лабораторных исследований был произведён забор воды из естественного водоёма, расположенного близ села Гвазда Бутурлиновского района Воронежской области, который используется местными аграриями для орошения сельскохозяйственных угодий. Проба была разделена на две части, одна из которых подвергалась озонной обработке, а вторая являлась контрольным вариантом. Лабораторные исследования позволили установить, что общая жесткость воды в естественном водоёме составила 21 дН, что соответствует 7,5 мг-экв/л. Данный уровень жесткости чрезмерен и негативно повлияет на растения. Озонирование при средней концентрации озона в озоноздушной смеси 4,67 мг/м<sup>3</sup> позволило снизить общую жесткость воды до 14 дН, что сопоставимо 5 мг-экв/л. Интенсивное смягчение воды происходило при дозах озонной обработки до 840 мг-мин/м<sup>3</sup>. Следовательно, озонирование снижает содержание многовалентных металлических ионов, которые в больших концентрациях отрицательно влияют на растения. Современные компактные, энергоэффективные, высокопроизводительные озонаторы позволяют достаточно легко встроить их в конструкцию дождевальных машин. Более мягкая вода положительно скажется на эффективности полива и надёжности работы оросительных систем. Кроме того, озонная обработка воды окажет бактерицидное и дезинфицирующее воздействие, что предотвратит развитие различных болезней и вредителей.

**Ключевые слова:** жесткость воды, озон, озонирование, полив.

## REDUCING IRRIGATION WATER HARDNESS BY OZONATION

*Ivan Baskakov*<sup>1</sup>, *Vladimir Orobinsky*<sup>2</sup>, *Arkady Himchenko*<sup>3</sup>, *Dmitry Golubenko*<sup>4</sup>,  
*Olga Chernova*<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,  
Voronezh, Russian Federation

<sup>5</sup> Municipal budgetary educational institution Paninskaya secondary school, Panino, Paninsky district  
Voronezh region, Russian Federation

<sup>1</sup> vasich2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6041-5943>

<sup>2</sup> main@agroeng.vsau.ru,

<sup>3</sup> himch.arkady@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>

<sup>4</sup> dimagolubenko2001@gmail.com

<sup>5</sup> chernovaol2012@yandex.ru

**Abstract.** *Abstract. The article presents the research on the effect of ozone treatment on the hardness of irrigation water. The effect of hard water on plant growth and development has been analyzed. It has been revealed that excessive magnesium and calcium ions in irrigation water lead to the suppression of agricultural crops and a decrease in their yield. To conduct laboratory studies, water was taken from a natural reservoir located near the village of Gvazda, Buturlinovskiy District, Voronezh Region, which is used by local farmers to irrigate agricultural land. The sample was divided into two parts, one of which was subjected to ozone treatment, and the second was a control variant. Laboratory studies have established that the total water hardness in the natural reservoir was 21 dH, which corresponds to 7.5 mg eq / l. This level of hardness is excessive and will negatively affect plants. Ozonation at an average ozone concentration in the ozone-air mixture of 4.67 mg/m<sup>3</sup> allowed to reduce the total water hardness to 14 dH, which is comparable to 5 mg eq/l. Intensive water softening occurred at ozone treatment doses of up to 840 mg min/m<sup>3</sup>. Consequently, ozonation reduces the content of polyvalent metal ions, which in high concentrations have a negative effect on plants. Modern compact, energy-efficient, high-performance ozonizers can be easily integrated into the design of sprinkler machines. Softer water will have a positive effect on the efficiency of irrigation and the reliability of irrigation systems. In addition, ozone water treatment will have a bactericidal and disinfectant effect, which will prevent the development of various diseases and pests.*

**Keywords:** water hardness, ozone, ozonation, irrigation.

**Для цитирования:** Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченков А.В., Голубенко Д.А., Чернова О.В. Снижение жёсткости оросительной воды озонирования // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 70, № 4. С. 7-16. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-7-16>.

**For citation:** Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenkov A., Golubenko D., Chernova O. Reducing irrigation water hardness by ozonation. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 70(4): 7-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-7-16>.

**Введение.** На большей территории России количество осадков, выпавших в период вегетации культурных растений, недостаточное. Это отрицательно сказывается на росте и развитии сельскохозяйственных культур. Недостаток влаги, особенно в жаркий период, может привести к гибели растений. Наиболее восприимчивыми к нехватке атмосферных осадков являются овощные и бахчевые культуры. Даже в достаточно благоприятных почвенно-климатических условиях недостаток влагообеспеченности приводит к значительному снижению урожайности сельскохозяйственных растений. Поэтому полив является неотъемлемой операцией технологии возделывания многих агрокультур. При этом воду зачастую берут из естественных водоёмов, которые имеют биологические, химические и механические примеси. Это приводит к снижению эффективности применения оросительных систем, удобрений, химических средств защиты, а также выходу из строя дождевальных машин, развитию болезней и т.д. [1-2].

Одним из наиболее важных факторов, определяющих качество воды, является её жёсткость, которая характеризуется содержанием многовалентных металлических ионов, в основном кальция и магния. Большое наличие данных положительно заряжённых частиц свидетельствует о большей жёсткости воды. Жёсткая вода негативно влияет на усвояемость питательных веществ растениями, на их метаболизм, на качество работы оросительных систем и т.д.

Для численной оценки жёсткости воды используют размерности мг·экв/л (миллиграмм-эквивалент на литр), градус dH (немецкий градус), ppm (американский градус), f<sub>o</sub> (французский градус). Соответственно в разных странах пользуются разными единицами измерения, но между ними есть четкая взаимосвязь

$$1 \text{ мг·экв/л} = 2,804 \text{ dH} = 5,005 f_o = 50,05 \text{ ppm} \quad (1)$$

По сути, жёсткость воды - это сумма миллимолей ионов магния и кальция, которая содержится в одном литре воды, то есть имеет размерность  $\text{ммоль/л} = \text{моль/м}^3$ . Можно пересчитать данный параметр в  $\text{мг/л}$ , поделив молярную массу на валентность. В результате получим, что при жесткости воды равной  $1 \text{ мг}\cdot\text{экв/л} = 1 \text{ ммоль/л}$  в каждом её литре содержится  $12,16 \text{ мг}$  ионов магния или  $20,04 \text{ мг}$  ионов кальция. По количественному содержанию данных веществ, то есть их концентрации, производят нормирование. В России различают мягкую ( $0...4 \text{ мг}\cdot\text{экв/л} = 0...11,2 \text{ дН}$ ), среднюю ( $4...8 \text{ мг}\cdot\text{экв/л} = 11,2...22,4 \text{ дН}$ ), жесткую ( $8...12 \text{ мг}\cdot\text{экв/л} = 22,4...33,6 \text{ дН}$ ) и очень жесткую (*свыше*  $12 \text{ мг}\cdot\text{экв/л} = \text{свыше } 33,6 \text{ дН}$ ) воду. В разных странах данная классификация разная. Например, в Германии в диапазон  $0...4 \text{ мг}\cdot\text{экв/л} = 0...11,2 \text{ дН}$  укладывается мягкая, средней жесткости, достаточно жёсткая и жёсткая вода. От степени жёсткости воды зависит её усвояемость растениями, сила удара капель и их отскок, засорение отложениями проходных сечений трубопроводов сельскохозяйственных машин, эффективность применения химических средств защиты и т.д. [3-8]. Поэтому существует необходимость снижения жёсткости воды при орошении и химической обработке растений.

Следовательно, исследования, направленные на снижение жёсткости воды для агропромышленных нужд, являются актуальными. Они имеют перспективы практического применения. Поэтому целью данной статьи является снижение жёсткости оросительной воды из естественного водоёма посредством применения процесса озонирования.

**Анализ состояния вопроса.** Вода является жидкостью и основным компонентом растений. Она необходима всем живым организмам для передвижения питательных веществ, синтеза различных элементов, получения энергии для роста и развития. Эффективность протекания данных процессов зависит от качества воды. Чрезмерное количество минералов ухудшает усвоение питательных веществ растениями, затрудняет их перемещение, блокирует метаболизм и т.д. При этом в исключительных случаях наблюдаются ожоги. Также при поливе жесткой водой отмечается снижение урожайности сельскохозяйственных культур по сравнению с орошением мягкой водой. Во время вегетационного периода из-за повышенного содержания солей металлов у растений желтеют листья, что связано с нарушением образования хлорофилла. Из-за развития хлороза происходит усыхание вегетативной части, иногда наблюдается повреждение плодов и гниль на корнях. Основным признаком полива жесткой водой является белый налёт на поверхности листьев и почвы. Кроме того, чрезмерное содержание минералов повышает кислотность почвы, а она отрицательно сказывается на способности растений усваивать питательные вещества. При этом большинство микроэлементов оказывают положительное действие только в определённых количествах, а их чрезмерное содержание негативно влияет на сельскохозяйственные культуры. Следовательно, жёсткая вода негативно влияет на целый спектр факторов, определяющих рост и развитие культурных растений [9-11].

Границы между жесткой и мягкой водой весьма условны. Из одной категории в другую можно перевести за счёт применения различных способов обработки, например кипячения, замораживания, оттаивания, использования соды, уксуса, кислоты, соли, крахмала и т.д. Известны химические смягчители воды, которые основаны на замещении ионов магния и кальция другими ионами, например ионами натрия. Однако использование такой воды для орошения не целесообразно, поскольку вместо одних веществ происходит образование других веществ, которые зачастую более вредные. Кроме того, происходит передозировка растений конкретным элементом. Например, натрий необходим клеткам для функционирования натрий-калиевых мембран. Однако его доза должны быть на уровне  $12 \text{ ppm}$ . Превышение содержания натрия свыше  $120 \text{ ppm}$  угнетает растения, подавляет их вегетацию и снижает урожайность большинства сельскохозяйственных культур. Такая же ситуация и с другими элементами. Кальция требуется достаточно много, около  $140 \text{ мг/л}$ , особенно в период роста, но дальнейшее повышение содержания данного элемента негативно скажется на развитии растений. Оптимальное содержание магния в воде при поливе составляет  $30 \text{ мг/л}$ . Поэтому для смягчения воды следует применять экологически безопасные приёмы, которые не увеличивают содержание сопутствующих элементов. Одним из наиболее перспективных способов снижения жесткости воды является применение озонной обработки. Озонная обработка разрушает стойкие водорастворимые соединения, высвобождая ионы металлов, которые окисляются до нерастворимых состояний и

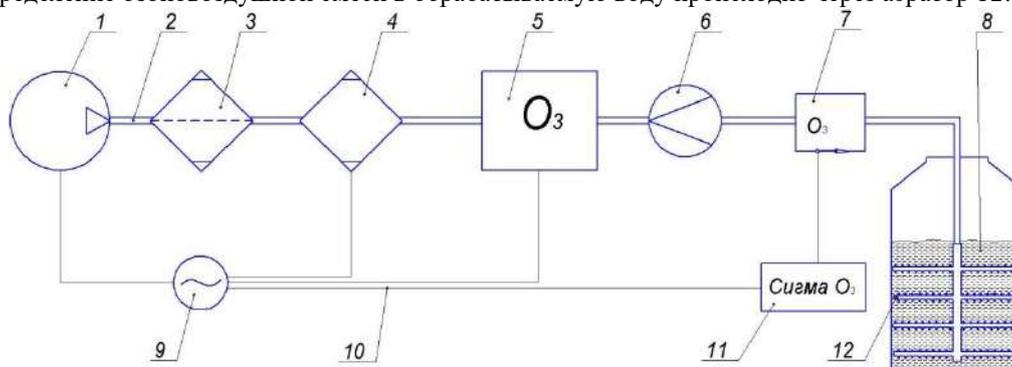
осаждаются. Образовавшиеся хлопья гидроокисей металлов хорошо удаляются из воды посредством фильтрования. Озонная обработка также одновременно обеззараживает воду от биологической микрофлоры, что особенно важно при использовании в качестве источника естественных водоёмов [9, 12-15].

Озон вступает в ряд химических реакций, поскольку достаточно легко расщепляется с атомарным кислородом. В воде газ разлагается даже быстрее, чем в воздухе. Растворимость озона в водной среде зависит от её реакции, солевого состава, температуры и других факторов. При озонировании за счёт разрушения стойких соединений происходит высвобождение ионов металлов, например железа ( $Fe^{2+}$ ) или марганца ( $Mn^{2+}$ ). В дальнейшем они окисляются до нерастворимых в воде состояний  $Fe^{3+}$  или  $Mn^{4+}$ . Данные частицы осаждаются и их можно достаточно легко удалить фильтрованием. Из-за высокой окислительной способности озон в той или иной мере влияет на большинство металлов, содержащихся в воде, особенно на те, которые имеют высокий окислительно-восстановительный потенциал. К ним можно отнести свинец, железо, марганец, кальций и т.д. Наилучшую эффективность фильтрации хлопьев гидроокиси металлов демонстрируют песчаные фильтры. Так, озонирование питьевой воды с концентрацией озона 0,6...1,4 мг/л в течение 10 минут с последующим пропуском через фильтр с эквивалентным диаметром песчинок 0,95 мм позволило снизить содержание марганца с исходных 0,4...0,7 мг/л до конечных 0,02 мг/л [16].

Следовательно, анализ ранее проведенных исследований показывает, что жесткая вода отрицательно влияет на развитие растений и эффективность операции полива, при этом существует необходимость её смягчения, за счёт применения процесса озонирования в комбинации с последующим фильтрованием. В связи с этим, необходимы дополнительные исследования по определению влияния озонной обработки на жесткость оросительной воды.

**Материалы и методы.** В ходе лабораторных исследований применяли активный эксперимент. Полученные результаты обрабатывали посредством методов математической статистики. Для определения взаимосвязи между жесткостью оросительной воды и дозой озонной обработки применяли регрессионный анализ.

Для проведения лабораторных исследований был произведён забор воды из естественного водоёма, расположенного близ села Гвазда Бутурлиновского района Воронежской области, который используется местными аграриями для орошения сельскохозяйственных угодий. После чего проба была разделена на две части, одна из которых подвергалась озонной обработке, а вторая являлась контрольным вариантом. Насыщение воды озоном проводили на лабораторной установке, состоящей из компрессора 1 (рис. 1), фильтра 3, осушителя воздуха 4, озонатора 5, расходомера 6 и ёмкости 8, которые соединены между собой посредством газопроводов 2. Озонаторная установка позволяет регулировать концентрацию озона, фиксируемую датчиком 7, подключённому через электрическую линию к стационарному газоанализатору «Сигма  $O_3$ » 11. Распределение озонозудной смеси в обрабатываемую воду происходит через аэратор 12.



1 – воздушный компрессор; 2 – газопровод; 3 – фильтр; 4 – осушитель воздуха; 5 – озонатор; 6 – расходомер; 7 – датчик определения концентрации озона; 8 – ёмкость с водой; 9 – источник переменного тока; 10 – электрические линии; 11 – газоанализатор «Сигма  $O_3$ »; 12 – аэратор

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки по озонированию воды

В процессе работы лабораторной установки компрессор 1 (рисунок 1) через фильтр 3 и осушитель 4 по газовадам 2 подаёт очищенный и обезвоженный воздух в озонатор 5, который насыщает его озоном. При этом расход рабочей смеси фиксируется расходомером 6. Текущая концентрация озона определяется газоанализатором 11 «Сигма O<sub>3</sub>», к которому подключен электрохимический датчик 7. В случае необходимости параметры озоновоздушной смеси корректируются за счёт изменения режима работы озонатора 5. После фиксации параметров озоновоздушная смесь поступает в емкость 8, где через аэратор 12 пронизывает обрабатываемую воду. Отработанная рабочая смесь выбрасывается в атмосферу.

Озонирование проводили в течение 3 часов при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси  $4,67 \text{ мг/м}^3$  и расходе агента  $150 \text{ л/ч}$ . При этом ежедневно отбирали пробу для анализа. Жесткость воды определяли в немецких градусах  $dH$ . Для этого необходимо в  $10 \text{ мл}$  жидкости каплями добавлять индикатор «NILPA HOME GH» постоянно перемешивая раствор. При этом происходит химическая реакция, сопровождающаяся изменением цвета от светло-розового через темно-розовый и красный к зелёному. Число капель реагента, добавленных в  $10 \text{ мл}$  воды, и делённое пополам, от которых произошло позеленение раствора, свидетельствуют об общей жесткости воды, определённой в немецких градусах  $dH$ . Следовательно, каждая капля индикатора соответствует  $0,5 \cdot dH$ . Для повышения точности все измерения проводили в трёхкратной повторности. Для перевода полученных значений в принятую в России размерность  $\text{мг} \cdot \text{экв/л}$  полученный результат необходимо разделить на  $2,804$ .

**Результаты и их обсуждение.** В ходе лабораторных исследований получены результаты, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты лабораторных исследований по определению влияния процесса озонирования на жесткость оросительной воды

Время озонирования, мин	Доза озонной обработки, $\text{мг} \cdot \text{мин/м}^3$	Общая жесткость воды, $dH$		Общая жесткость воды, $\text{мг} \cdot \text{экв/л}$	
		По повторностям	Среднее значение	По повторностям	Среднее значение
0 (контроль)	0	20	21	7,133	7,489
		21		7,489	
		22		7,846	
60	280	17,5	17,83	6,241	6,359
		17,5		6,241	
		18,5		6,598	
120	560	15	14,5	5,35	5,171
		14,5		5,171	
		14		4,993	
180	840	14	14	4,993	4,993
		13		4,636	
		15		5,35	

Анализ таблицы 1 показывает, что исходная общая жесткость воды из естественных водоёмов по принятым в России нормам относится к верхней границе среднего уровня жесткости. Стоит заметить что, в нашей стране очень лояльные требования. Общая жесткость воды равная  $21 \text{ dH} \approx 7,5 \text{ мг} \cdot \text{экв/л}$  в Германии согласно стандарту DIN 19643 имела бы наивысшую степень, то есть относилась к очень жёсткой воде. В пересчёте на содержание ионов кальция получится, что в каждом литре содержится свыше  $150 \text{ мг}$  данного вещества или более  $91 \text{ мг/л}$  ионов магния, что чрезмерно много для большинства растений. Такое высокое содержание многовалентных металлических ионов негативно скажется на усвоении растениями питательных веществ и их перемещении, также будет препятствовать метаболизму и забивать отложениями проходные сечения оросительных систем. Озонирование в течение часа при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси  $4,67 \text{ мг/м}^3$  способствовало снижению жёсткости воды на  $3,27 \text{ dH} \approx 1,17 \text{ мг} \cdot \text{экв/л}$ . Тем самым произойдет смягчение, что положительно скажется на развитии

растений. Дальнейшая часовая озонная обработка при тех же условиях снизило жёсткость воды ещё на  $3,33 \text{ dH} \approx 1,19 \text{ мг-экв/л}$ . Как видно из таблицы 1 эффективность процесса в первые два часа операции озонирования практически идентичная. Третий час озонной обработки снизил общую жёсткость воды еще на  $0,5 \text{ dH} \approx 0,18 \text{ мг-экв/л}$ , что говорит об отсутствии необходимости столь продолжительной обработки. Однако без статистической обработки результатов исследований оценить качество эксперимента и достоверно определить взаимосвязь между общей жёсткостью оросительной воды и дозой озонной обработки невозможно. Для обработки полученных экспериментальных данных использовались методы дисперсионного и регрессионного анализа.

Для оценки воспроизводимости эксперимента сравнивались дисперсии в отдельных повторениях опытов. Использовались тесты Левена и Бартлетта. В этих тестах в качестве нулевой гипотезы предполагается, что дисперсии одинаковы, то есть однородны и неразличимы. В обоих случаях вероятность нулевой гипотезы составила более 0,74. На коробчатой диаграмме (рисунок 2) видно, что разброс данных для всех доз озонной обработки воды достаточно близок. Обычно нулевая гипотеза отвергается при достаточно низких вероятностях, расчётном уровне значимости ниже, чем 0,05. Кроме того, применённые тесты, в особенности Левена, очень чувствительны к разбросу данных и переход к низким уровням вероятности происходит очень быстро. Таким образом, можем утверждать, что существенных случайных ошибок нет, а результаты опытов однородны и воспроизводимы.

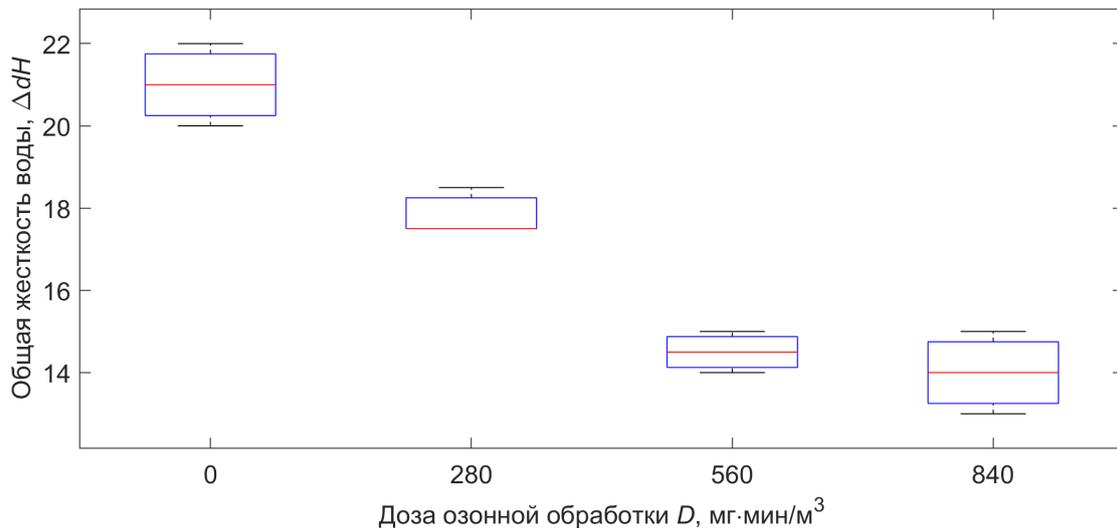


Рисунок 2 – Коробчатая диаграмма разброса значений общей жёсткости воды при разных дозах озонной обработки

Для поиска уравнения регрессии по анализу диаграммы разброса точек эксперимента была выбрана экспоненциальная модель. Это связано с тем, что результат снижения жёсткости воды является следствием химических реакций, которые зависят от концентрации взаимодействующих веществ. Таким образом, при увеличении дозы скорость снижения жёсткости будет уменьшаться из-за уменьшения концентрации веществ, вступающих в реакцию.

Использование методов машинного обучения для поиска уравнения регрессии среде Matlab позволило получить коэффициенты уравнения вида

$$dH = a_1 + a_2 e^{a_3 D}, \quad (1)$$

где  $D$  – доза озонной обработки, мг·мин/м<sup>3</sup>;

$a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Расчётные значения коэффициентов уравнения регрессии и их статистические критерии, приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Коэффициенты уравнения регрессии

Коэффициент уравнения регрессии	Значение	Стандартная ошибка коэффициентов	Двусторонний критерий Стьюдента	Расчетный уровень значимости
$\alpha_1$	11,522	2,3704	4,8608	0,00089482
$\alpha_2$	9,5819	2,2842	4,1949	0,0023243
$\alpha_3$	- 0,001751	0,0008265	- 2,1186	0,063178

Количество наблюдений: 12  
 Число степеней свободы ошибки: 9  
 Среднеквадратическая ошибка: 0,892  
 Коэффициент детерминации  $R^2$ : 0,929  
 Скорректированный коэффициент детерминации  $R_{ck}^2$ : 0,913  
 F-статистика по сравнению с постоянной моделью: 58,8  
 Значение расчетного уровня значимости  $p = 6,81 \cdot 10^{-06}$

Как видно из таблицы 1, все коэффициенты имеют достаточно низкий уровень значимости. Учитывая общепринятую в таких исследованиях доверительную вероятность 0,95, при двустороннем критерии Стьюдента граничным будет расчётный уровень значимости 0,1. Таким образом, коэффициент  $\alpha_3$  также является значимым. Расчётный коэффициент детерминации для данного уравнения составляет 0,929, а его скорректированное значение критерия Фишера  $F=58,8$  доказывает, что вероятность нулевой гипотезы о неизменяемости жёсткости воды в зависимости от дозы озонной обработки по сравнению с выбранной зависимостью, стремится к нулю.

Результаты подбора модели нелинейной регрессии, сопоставление значений предсказаний модели с экспериментальными данными, а также границы доверительного интервала представлены на рисунке 3.

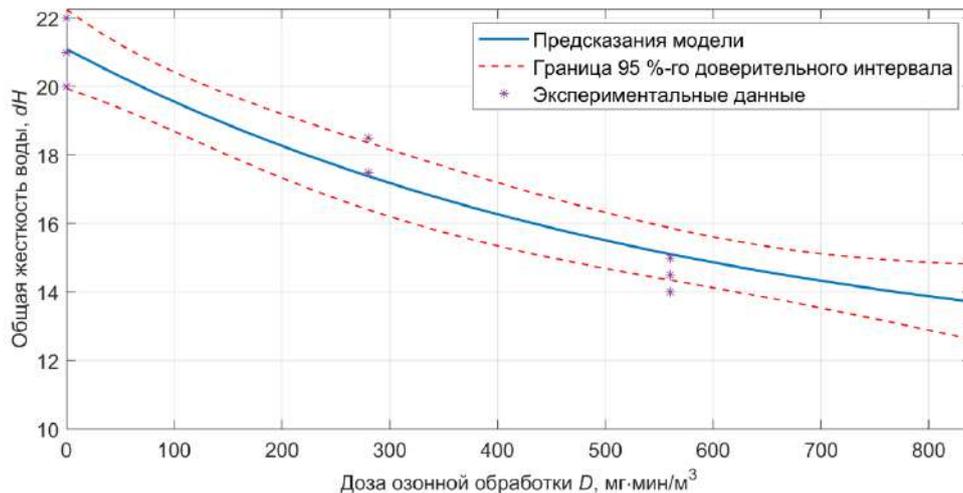


Рисунок 3 – Зависимость общей жёсткости воды от дозы озонной обработки

При наличии повторности опытов адекватность модели проверяется сопоставлением средней дисперсии ошибок повторных опытов и дисперсии отклонение предсказаний модели от средних значений в эксперименте. В случае если дисперсии неразличимы, то модель считается адекватной. В случае использования вместо средней дисперсии ошибок повторных опытов общей дисперсии ошибок вероятность отклонения нулевой гипотезы о том, что дисперсии не различимы, повышается. Поэтому использовался последний вариант.

Тест Левена показал, что вероятность однородности дисперсии составляет 0,2105. Этот достаточно высокая вероятность, которая не позволяет отвергнуть гипотезу об однородности.

Таким образом, дисперсии ошибок модели и ошибок эксперимента близки и не различимы (рисунок 4),

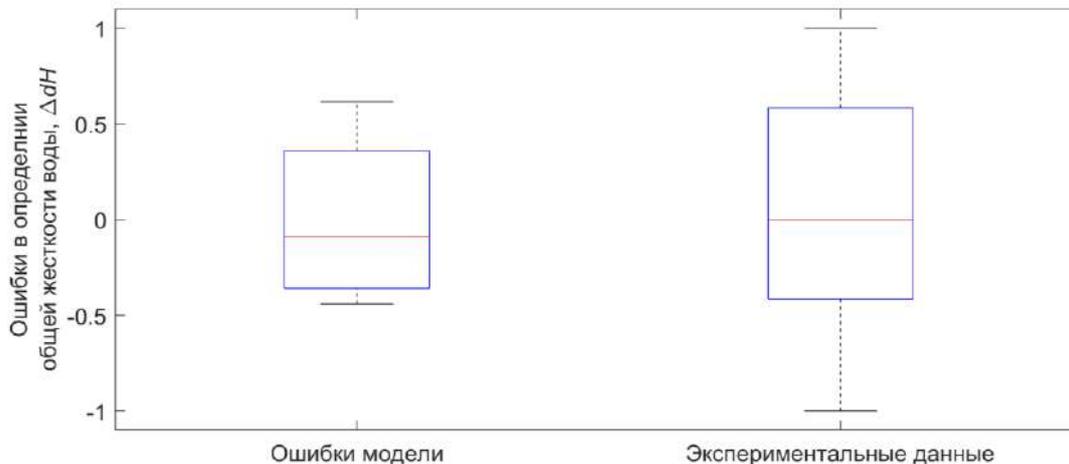


Рисунок 4 – Коробчатая диаграмма ошибок эксперимента и модели

Анализ ошибок эксперимента и модели позволяет констатировать, что полученное уравнение регрессии изменения общей жёсткости воды от дозы озонной обработки адекватно.

**Заключение.** Таким образом, вода из естественных водоёмов слишком жесткая, что отрицательно сказывается на метаболизме растений, усвояемости питательных веществ, качестве работы оросительных систем и т.д. Озонирование позволяет разрушить стойкие водорастворимые соединения, высвобождая ионы металлов, окисляемые до нерастворимых состояний, которые осаждаются и достаточно легко удаляются фильтрованием. При исходной общей жесткости воды в естественном водоёме  $21 \text{ dH} \approx 7,5 \text{ мг·экв/л}$  при дозах озонной обработки до  $840 \text{ мг·мин/м}^3$  происходит интенсивное снижение данного показателя до  $14 \text{ dH} \approx 5 \text{ мг·экв/л}$ . Это уменьшит содержание многовалентных металлических ионов негативно влияющих на растения в больших концентрациях. Современные озонаторы достаточно компактны, энергоэффективны и высокопроизводительны, что позволяет их вписать в конструкцию оросительных систем. Более мягкая вода положительно скажется на эффективности полива и надёжности дождевальных машин. Кроме того, озонирование окажет бактерицидное и дезинфицирующее воздействие на оросительную воду, предотвратив развитие различных болезней и вредителей. Необходимы дальнейшие долгосрочные исследования по влиянию озонных оросительных систем на развитие растений, формирование урожайности сельскохозяйственных культур, надёжность дождевальных машин.

#### Список источников

1. Grasso D., Weber W. J., Dekam J. A. Effects of peroxidation with ozone on water quality: a case study // American Water Works Association Journal. 1989. V. 81. № 6. Pp. 22-28.
2. Shabalina A.V., Mokrousov G.M., Fakhrutdinova E. D., Izaak T.I., Wu J.J. Water ozonation with copper catalyst for organic pollutants removal // Eurasian Chemico-Technological Journal. 2012. Vol. 14, No.3. Pp. 219-226. DOI 10.18321/ectj117.
3. Глущенко Л.Ф., Глущенко Н.А. Использование озонированной воды для целенаправленного управления технологическими процессами // Фундаментальные исследования. 2007. № 12-2. С. 264.
4. Дзюбо В.В., Алферова Л.И. Специфика озонирования при промышленной водоподготовке (Обзор) // Экология промышленного производства. 2016. № 4(96). С. 14-20.

5. Козин Д.А., Прокофьев В.А., Прокофьева Т.В. Опыт использования озона для обезжелезивания вод сложного состава // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 3. С. 32-39. DOI 10.35776/VST.2022.03.04.
6. Корса-Вавилова Е.В., Науменко Э.В., Гибалов В.И., Божко В.И., Шмелев А.Я. Определение оптимальных технологических параметров обработки воды озоном // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 7. С. 92-96. DOI 10.37882/2223-2982.2023.07.21.
7. Курмачева В.С., Солоницына Д.А., Солунин С.А. Озонирование как способ очистки воды // Уральская горная школа – регионам: материалы науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 10 апреля 2023 г.). Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. С. 318-319.
8. Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченко А.В., Чернышов А.В., Чернова О.В. Влияние озона на коррозионное поведение металлов и сплавов // Наука в Центральной России. 2024. Т.68, №2. С. 141-149. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-141-149.
9. Аканова Н.И., Козлова А.В., Мухина М.Т. Роль магния в системе питания растений // Агрехимический вестник. 2021. № 6. С. 66-72. DOI 10.24412/1029-2551-2021-6-014.
10. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.M., Chernyshov A.V. Influence of ozonation in seed storage on corn grain yield and its quality // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness (TSIA-2019) (Russia, Stavropol, October 21-22, 2019). IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 488. №. 012007. 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012007.
11. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V. Grain disinfection with ozone-air mixture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Environmental Problems of Food Security: International Scientific and Practical Conference (Russia, Voronezh, 21-22 February, 2022). IOP Publishing Ltd, 2022. Vol. 1043. №012037. 5 p. DOI: 10.1088/1755-1315/1043/1/012037.
12. Шабалина А.В., Фахрутдинова Е.Д., Федотова М.И., Белова К.А., Быкова П.В. Исследование изменения рН воды при озонировании // Вестник Томского государственного университета. 2013. №375. С. 200-203.
13. Самойлов М.А. Озонирование как способ улучшения качества воды // Знания молодых – будущее России: сб. статей XXI междунар. конф. (Киров, 5-7 апреля 2023 г.). Киров: Вятский государственный агротехнологический университет, 2023. С. 498-501.
14. Турк Д.А., Тлехусеж М.А. Современные методы очистки воды // Наукосфера. 2023. № 8-2. С. 77-84. DOI 10.5281/zenodo.8316003.
15. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V. Ozone pest control of grain // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Advanced Agriculture for Sustainable Future (Uzbekistan, Tashkent, 23-25 February, 2022). IOP Publishing Ltd, 2023. Vol. 1138. №012026. 5 p. DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012026.
16. Орлов В.А. Озонирование воды: монография. М.: Стройиздат, 1984. 88 с.

#### References

1. Grasso D., Weber W. J., Dekam J. A. Effects of peroxidation with ozone on water quality: a case study // American Water Works Association Journal. 1989. V. 81. № 6. Pp. 22-28.
2. Shabalina A.V., Mokrousov G.M., Fakhrutdinova E. D., Izaak T.I., Wu J.J. Water ozonation with copper catalyst for organic pollutants removal // Eurasian Chemico-Technological Journal. 2012. Vol. 14, No.3. Pp. 219-226. DOI 10.18321/ectj117.
3. Glushchenko L.F., Glushchenko N.A. Use of ozonated water for targeted control of technological processes // Fundamental Research. 2007. No. 12-2. P. 264.
4. Dzyubo V.V., Alferova L.I. Specifics of ozonation during industrial water treatment (Review) // Ecology of industrial production. 2016. No. 4(96). Pp. 14-20.
5. Kozin D.A., Prokofiev V.A., Prokofieva T.V. Experience of using ozone for deferrization of waters of complex composition // Water supply and sanitary equipment. 2022. No. 3. Pp. 32-39. DOI 10.35776/VST.2022.03.04.

6. Korsa-Vavilova E.V., Naumenko E.V., Gibalov V.I., Bozhko V.I., Shmelev A.Ya. Determination of optimal technological parameters for water treatment with ozone // Modern science: current problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences. 2023. No. 7. Pp. 92-96. DOI 10.37882/2223-2982.2023.07.21.
7. Kurmacheva V.S., Solonitsyna D.A., Solunin S.A. Ozonation as a method of water purification // Ural Mining School - regions: scientific and practical materials. conf. (Ekaterinburg, April 10, 2023). Ekaterinburg: Ural State Mining University, 2023. Pp. 318-319.
- 8 Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Khimchenko A.V., Chernyshov A.V., Chernova O.V. The influence of ozone on the corrosion behavior of metals and alloys // Science in Central Russia. 2024. T.68, No. 2. Pp. 141-149. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-141-149.
9. Akanova N.I., Kozlova A.V., Mukhina M.T. The role of magnesium in the plant nutrition system // Agrochemical Bulletin. 2021. No. 6. Pp. 66-72. DOI 10.24412/1029-2551-2021-6-014.
10. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.M., Chernyshov A.V. Influence of ozonation in seed storage on corn grain yield and its quality // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness (TSIA-2019) (Russia, Stavropol, October 21-22, 2019). IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 488. №. 012007. 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012007.
11. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V. Grain disinfection with ozone-air mixture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Environmental Problems of Food Security: International Scientific and Practical Conference (Russia, Voronezh, 21-22 February, 2022). IOP Publishing Ltd, 2022. Vol. 1043. №012037. 5 p. DOI: 10.1088/1755-1315/1043/1/012037 .
12. Shabalina A.V., Fakhruddinova E.D., Fedotova M.I., Belova K.A., Bykova P.V. Study of changes in water pH during ozonation // Bulletin of Tomsk State University. 2013. No. 375. Pp. 200-203.
13. Samoilov M.A. Ozonation as a way to improve water quality // Knowledge of the young - the future of Russia: collection. Articles of the XXI International conf. (Kirov, April 5-7, 2023). Kirov: Vyatka State Agrotechnological University, 2023. Pp. 498-501.
14. Turk D.A., Tlehushezh M.A. Modern methods of water purification // Naukosfera. 2023. No. 8-2. Pp. 77-84. DOI 10.5281/zenodo.8316003.
15. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V. Ozone pest control of grain // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Advanced Agriculture for Sustainable Future (Uzbekistan, Tashkent, 23-25 February, 2022). IOP Publishing Ltd, 2023. Vol. 1138. №012026. 5 p. DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012026 .
16. Orlov V.A. Ozonation of water: monograph. M.: Stroyizdat, 1984. 88 p.

#### Информация об авторах

И.В. Баскаков – доктор сельскохозяйственных наук, доцент; В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; А.В. Химченко – кандидат технических наук, доцент; Д.А. Голубенко – магистрант; О.В. Чернова – соискатель.

#### Information about the authors

I. Baskakov – Full Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor; V. Orobinsky – Full Doctor of Agricultural Sciences, Professor; A. Himchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; D. Golubenko – undergraduate student; O.Chernova – the applicant.

**Вклад авторов** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**Contribution of the authors:** all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

**The authors declare no conflict of interest.**

Поступила в редакцию (Received): 06.07.2024 Принята к публикации (Accepted): 20.08.2024