

Тип статьи: научная
УДК 631.365.32: 546.214
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-26-32

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА И ОБЪЁМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОЧАГА ОЗОНА В ЗЕРНОВОМ ВОРОХЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ОЗОНИРОВАНИЯ

Антон Дмитриевич Головин¹, **Илья Алексеевич Пожидает**², **Иван Васильевич Баскаков**³,
Владимир Иванович Оробинский⁴, **Аркадий Васильевич Химченко**⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
г. Воронеж, Российская Федерация
¹ gton_02@mail.ru, ² proda_48@mail.ru,
³ vasich2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6041-5943>,
⁴ main@agroeng.vsau.ru,
⁵ himch.arkady@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>

Автор ответственный за переписку: Антон Дмитриевич Головин, gton_02@mail.ru
Corresponding author: Anton Golovin, gton_02@mail.ru

Реферат. На сегодняшний день одним из наиболее перспективных способов обработки сельскохозяйственной продукции является процесс озонирования. Воздействие озона на зерно позволит его обеззаразить, простимулировать ростовые процессы посевного материала, не неся за собой вредоносных выбросов в окружающую среду. Целью исследований являлось нахождение оптимального времени озонирования зерна и семян в зависимости от скорости обработки определённого объёма зернового материала. Для её достижения использовались численные методы оптимизации, а именно метод глобального поиска *patternsearch*, который позволит определить наиболее рациональный режим озонирования для заданных условий, использовались для её достижения. Очаг распространения озона в зерновом ворохе при озонировании в течение 10...60 мин по форме приближен к эллипсоиду, но имеет несколько иное математическое описание. Полученные интерполяцией математические модели позволяют определить минимальное время озонирования и максимальную скорость озонной обработки единицы объёма зернового вороха. Выявлено, что увеличение обработанного объёма зерна за счет большей продолжительности операции не имеет смысла, так как будет способствовать росту затрат энергии и средств. В заданных условиях время озонирования, равное 1270 секунд, обеспечивает максимальную скорость озонной обработки 3059 мм³/с единицы объёма зерна. Оптимизация позволит при минимальных затратах проозонировать максимальный объём зернохранилища наиболее быстро. Наименьшее время обработки единицы объёма в данных условиях составило 0,000327 с/мм³. Другие параметры озонирования будут иметь иные оптимальные значения, поэтому предложенная методика является основой соответствующей программы ЭВМ, которая автоматически определит оптимальный режим озонирования для конкретных условий.

Ключевые слова: озон, озонозодушная смесь, форма, размер, распространение озона в зерновом ворохе, время.

THEORETICAL PREREQUISITES FOR DETERMINING OF THE SIZE AND VOLUME OF OZONE DISTRIBUTION IN A GRAIN HEAP AND OPTIMIZATION OF OZONIZATION TIME

Anton Golovin¹, **Ilya Pozhidaev**², **Ivan Baskakov**³, **Vladimir Orobinsky**⁴, **Arkady Khimchenko**⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,
Voronezh, Russian Federation
¹ gton_02@mail.ru, ² proda_48@mail.ru, ³ vasich2@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-6041-5943>, ⁴ main@agroeng.vsau.ru,

⁵ himch.arkady@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>

Abstract. *One of the most promising methods for processing agricultural products today is the ozonation process. The effect of ozone on grain will allow it to be disinfected and stimulate the growth processes of the seed, without causing harmful emissions into the environment. The purpose of the research was to find the optimal time for ozonation of grain and seeds depending on the processing speed of a certain volume of grain material. To achieve it, numerical optimization methods were used, namely the patternsearch global search method, which will determine the most rational ozonation regime for given conditions, were used to achieve it. The source of ozone propagation in a grain heap during ozonation for 10...60 minutes is close in shape to an ellipsoid, but has a slightly different mathematical description. The mathematical models obtained by interpolation make it possible to determine the minimum ozonation time and the maximum speed of ozone treatment per unit volume of a grain heap. It was revealed that increasing the processed volume of grain due to the longer duration of the operation does not make sense, as it will contribute to an increase in energy and cost costs. Under given conditions, an ozonation time of 1270 seconds provides a maximum ozone treatment rate of 3059 mm³/s per unit volume of grain. Optimization will make it possible to ozone the maximum volume of a grain storage facility as quickly as possible at minimal cost. The shortest processing time per unit volume under these conditions was 0.000327 s/mm³. Other ozonation parameters will have different optimal values, therefore the proposed methodology is the basis of an appropriate computer program that will automatically determine the optimal ozonation regime for specific conditions.*

Keywords: *ozone, ozone-air mixture, shape, size, ozone distribution in the grain heap, time.*

Для цитирования: Головин А.Д., Пожидаев И.А., Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченко А.В. Теоритические предпосылки определения размера и объёма распространения очага в зерновом ворохе и оптимизации времени озонирования // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 26-32. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-26-32>.

For citation: Golovin A., Pozhidaev I., Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenko A. Theoretical prerequisites for determining of the size and volume of ozone distribution in a grain heap and optimization of ozonization time. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 26-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-26-32>.

Введение. В связи с неуклонным ростом валового сбора зерновых культур в нашей стране остро стоит вопрос о сохранности и по возможности увеличении качества собранного урожая в период его хранения. Конечно же, чтобы зерно или семена не теряли свои свойства необходимо на них каким-либо образом воздействовать. Некачественная сельскохозяйственная продукция или её порча в период хранения приведёт к дефициту продуктов питания на мировом рынке.

Известны способы поддержания качества зерна и семян при хранении на должном уровне. Однако одни из них негативно сказываются на экологии, а другие снижают некоторые свойства, например всхожесть. Поэтому агропромышленные предприятия стараются найти такие способы обработки, которые были бы безопасны для природы и не оказывали вредного воздействия на другие показатели зерна и семян. Необходимо внедрять в технологический процесс экологически безопасные методы обработки, которые позволят свести к минимуму использование опасных химических веществ. Одним из таких методов, способствующих безопасному хранению зерна и посевного материала, относится озонная обработка [3]. За счёт своих окислительных свойств, озон позволяет предотвратить развитие вредных микроорганизмов и насекомых, а также стимулирует ростовые свойства семян сельскохозяйственных культур. При этом озонирование не оказывает вредного воздействия на окружающую среду, поскольку газ распадается до кислорода, лишь обогащая атмосферу [2]. Таким образом, использование экологически чистых методов озонной обработки зерна и семян является перспективным направлением исследований, направленным на поддержание их качества при хранении и снижение негативного влияния сельскохозяйственной деятельности на окружающую среду.

Целью исследований является оптимизация времени озонирования зерна и семян в зависимости от скорости обработки определённого объёма зернового материала.

Результаты и их обсуждение. В Воронежском ГАУ были проведены теоретические исследования, направленные на определение формы и размера очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от времени озонирования. Установлено [1], что зона расхождения газа в зерне приближена к эллипсоиду, но имеет несколько иное математическое описание, которое можно представить моделями на основе регрессии Гауссовых процессов [7]. Однако интересна не только форма, но и его реальный размер. Соотношение размеров очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от времени озонирования, полученное экспериментальным путём и представленное в виде точечной диаграммы (scatter plot), позволяющей оценить разброс значений различных параметров, приведено на рисунок 1.

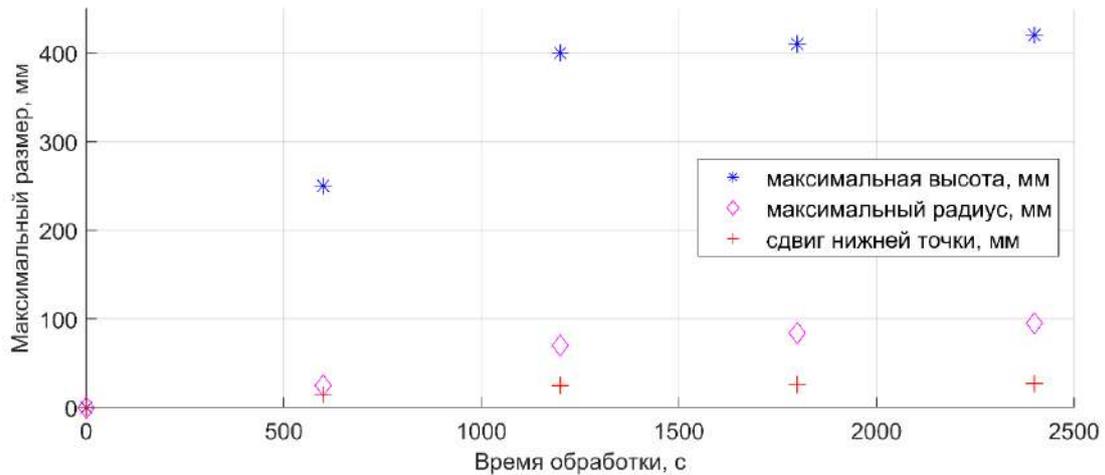


Рисунок 1 – Точечная диаграмма (Scatter plot) соотношение размеров очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от времени озонирования

Анализ результатов исследований [7] показывает, что можно определить параметры формы очага распространения озона в зерне в зависимости от времени обработки. Данные значения привязаны к максимальным размерам [8]. Следовательно, зная последние, и как они меняются по времени, можно определить форму и рассчитать объём в любой момент обработки. Данные закономерности крайне сложно описать типовыми математическими моделями, но они хорошо моделируются кусочно-полиномиальным методом РСНР [6] (рисунки 2–4).

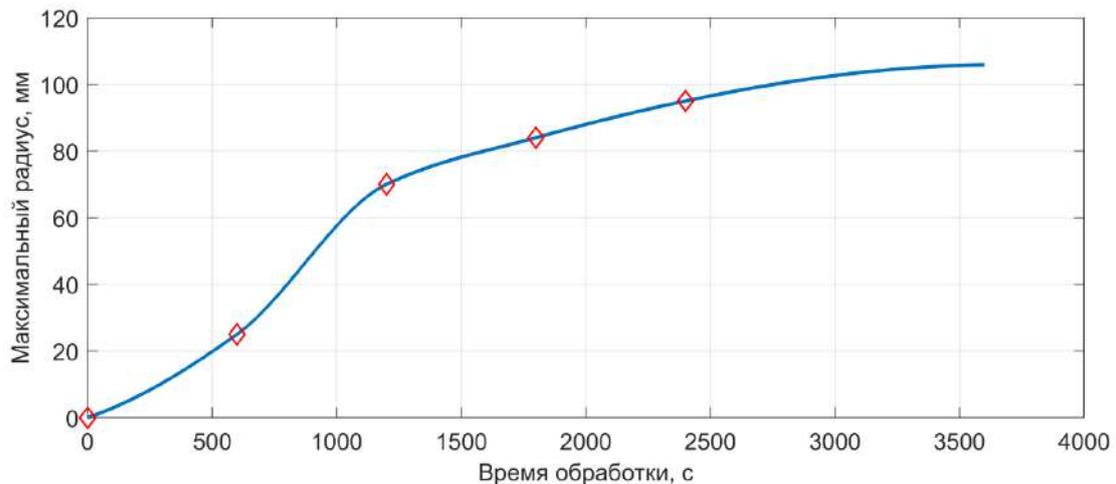


Рисунок 2 – Результат предсказаний максимального радиуса очага распространения озона в зерне

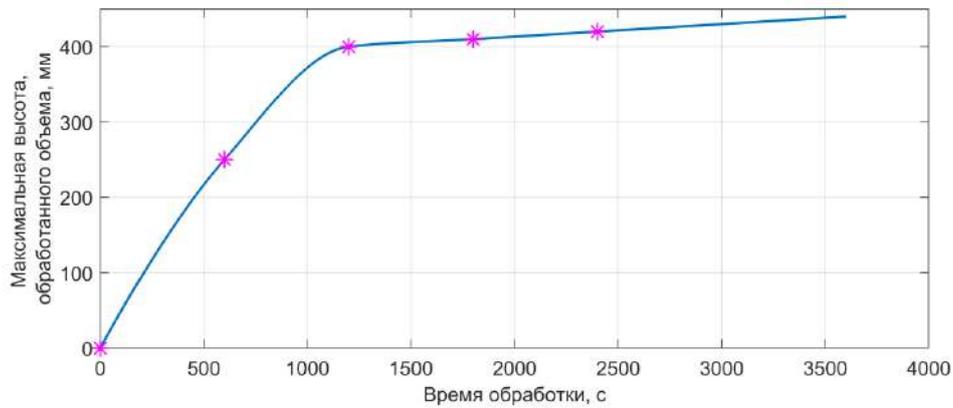


Рисунок 3 – Результат предсказаний максимальной высоты очага распространения озона в зерне

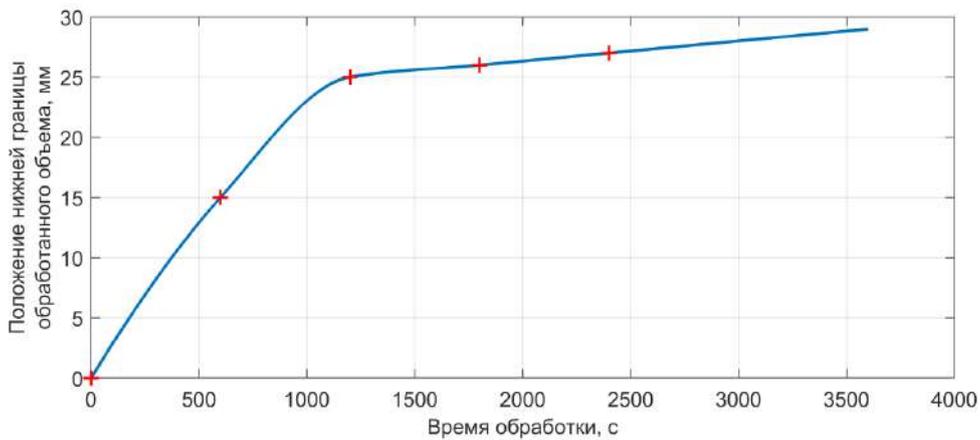


Рисунок 4 – Результат предсказаний максимального сдвига нижней точки очага распространения озона в зерне

Исходя из ранее полученных результатов [7] объём (V) обработанной поверхности зернового материала определяется интегрированием, которое можно представить в цилиндрической системе координат в виде следующего выражения:

$$V = \int_0^h \int_0^{2\pi} r(\varphi, h) d\varphi dh, \quad (1)$$

где $r(\varphi, h)$ – зависимость радиуса очага распространения озона в зерне от высоты h при угле φ поворота радиус-вектора точки или границы обработанной поверхности.

Тогда с учётом изменения по времени данное уравнение примет следующий вид:

$$V(t) = \int_0^h r(t, h(t)) \int_0^{2\pi} d\varphi dh = \int_0^h 2\pi \frac{r(t, h(t))^2}{2} dh, \quad (2)$$

где t – время обработки, с.

В итоге преобразований выражение (2) будет иметь следующий вид:

$$V(t) = \int_0^{h_{\max}(t)} 2\pi \frac{(r_{\max}(t) r_{\text{омн}}(h_{\text{омн}}, t))^2}{2} dh \quad (3)$$

Значения объема получены численным интегрированием [5]. Оно проводилось с шагом, обеспечивающим погрешность не выше 0,1%. В результате получена зависимость изменения объема обработанного озонем зерна от времени озонирования (рисунок 5).

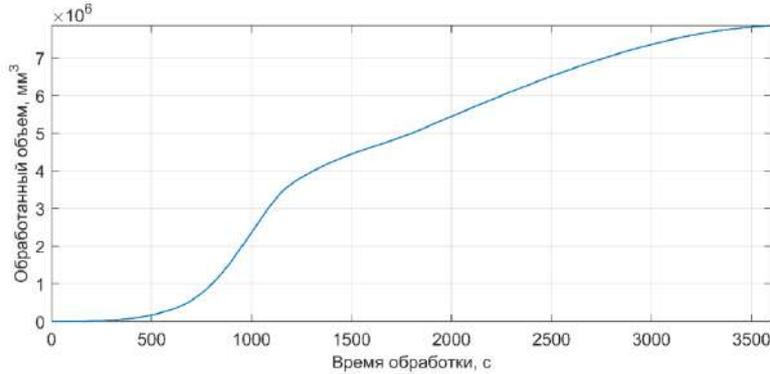


Рисунок 5 – Изменение объема очага распространения озона в зерне в зависимости от времени обработки

Из графика видно, что он имеет некоторые точки перегиба. Следовательно, скорость изменения объема обработанного озонем зерна в этих точках меняется. Поэтому она может быть критерием оптимизации. Скорость обработки (v_v) озонем объема зерна в общем виде может быть записана как

$$v_v(t) = \frac{V(t)}{t}. \quad (4)$$

Определение оптимального времени обработки зерна озонем с точки зрения наибольшей скорости изменения проозонированного объема получено с помощью численных методов оптимизации. Они в основном сводятся к поиску минимума. Максимум является обратной функцией. Как правило, различные методические приёмы могут давать некоторые отклонения в результатах. В конечном итоге выбор пал на метод глобального поиска patternsearch [4], поскольку данные получены обработкой экспериментальных значений с использованием численных методов. Эта методология позволяет определить локальные минимумы. Результаты исследований представлены на рисунке 6.

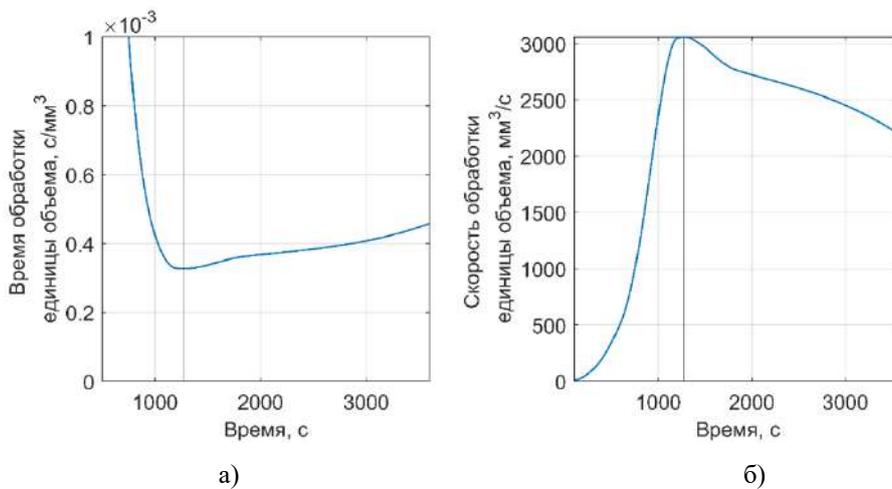


Рисунок 6 – Время (а) и скорость (б) обработки озонем единицы объема зерна в зависимости от времени озонирования

Вертикальной линией (рис. 6) показано минимальное время обработки озоном единицы объёма зерна. Анализ результатов исследований показывает, что скорость обработки озоновоздушной смеси в зерновом ворохе растёт и в момент времени 1270 секунд происходит перегиб. Это означает, что в данный момент объём, в который поступила озоновоздушная смесь, максимальный. Далее он начинает постепенно снижаться. Увеличение объёма будет происходить, но не так интенсивно. Стоит отметить, что данное время обработки, оптимально для этого эксперимента. Можно предположить, что спад скорости роста объёма связан с тем, что происходит поглощение газа зерном в средних слоях. Нельзя утверждать, что распространение озона в зерновом ворохе будет происходить равномерно. Ведь ближайшие к месту подачи слои получают большие дозы озонной обработки, чем более удалённые горизонты. Поэтому, очевидно, нет необходимости в дальнейшем увеличении обработанного объёма за счет повышения времени озонирования. Смысл имеет рациональное размещение некоторого количества источников подачи озоновоздушной смеси в зерно для того, чтобы за один раз провести озонирование необходимого объёма. Следовательно, стоит определить на каком расстоянии друг от друга надо устанавливать подающие озон сопла, чтобы обработка была равномерной.

Заключение. Таким образом, удалось достичь поставленной цели и получить математические модели изменения размера и объёма очага распространения озона в зерне, позволяющие определить минимальное время озонирования и максимальную скорость озонной обработки единицы объёма зернового вороха. Поскольку полученные зависимости имеют экстремумы, то значит можно найти оптимальные значения изменяемых параметров. Очевидно, что нет необходимости дальнейшего увеличения обработанного объёма зерна за счет большей продолжительности операции, поскольку это будет способствовать росту затрат энергии и средств. В заданных условиях минимальное время озонирования 1270 секунд, обеспечивает максимальную скорость озонной обработки $3059 \text{ мм}^3/\text{с}$ единицы объёма зерна. Реализация предложенного алгоритма в соответствующей программе ЭВМ, позволит найти оптимальный режим озонирования для конкретных условий. Это в свою очередь необходимо для нахождения рабочей зоны озона в зерновом ворохе при заданных параметрах и создаёт предпосылки для определения рационального количества сопел, подающих озоновоздушную смесь, обеспечивающих наилучшую равномерность распространения газа в зерновом материале. Тем самым при минимальных затратах будет обработан максимальный объём зерна за наименьшее время.

Список источников

1. Головин А.Д., Пожидаев И.А., Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченко А.В. Теоретические предпосылки определения формы и размера очага распространения озона в зерновом ворохе // Наука в Центральной России. – 2024. – Т.67, № 1. – С. 76-89. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-76-89.
2. Нормов Д.А., Пожидаев Д.В., Волов Р.В., Чижов Д.С., Тимофеев В.П. Исследование влияния электроозонирования на всхожесть семян // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – №112. – С.1438-1451.
3. Audet Charles, J. E. Dennis Jr. Analysis of Generalized Pattern Searches // *SIAM Journal on Optimization*. – 2003. – Vol. 13(3). – Pp. 889-903. – DOI: 10.1137/S1052623400378742.
4. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.V., 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.
5. Kahaner D., Moler C., Nash S. Numerical Methods and Software. Upper Saddle River. – New Jersey: Prentice Hall, 1988. – 495 p. – DOI: 10.1137/1033033.
6. Fritsch F.N., Carlson R.E. Monotone Piecewise Cubic Interpolation // *SIAM Journal on Numerical Analysis*. – 1980. – Vol. 17(2). – Pp.238-246. – DOI: 10.1137/0717021.
7. Rasmussen C.E., Williams C.K.I. Gaussian Processes for Machine Learning. – Cambridge: MIT Press, 2006 – 272 p. – DOI: 10.1142/S0129065704001899.

8. Statistics and Machine Learning Toolbox. User's Guide. Math- Works: Documentation R. 2022a. – Math Works, 2022. – 10346 p.

References

1. Golovin A.D., Pozhidaev I.A., Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Khimchenko A.V. Theoretical prerequisites for determining the share and size of the ozone distribution center in a grain heap // Science in the Central Russia – 2024. – Vol. 67(1). – Pp. 76-89. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-76-89.

2. Normov D.A., Pozhidaev D.V., Volov R.V., Chizhov D.S., Timofeev V.P. Studying the influence of electrical ozonation to seed germination // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. – 2015. – Vol. 112. – Pp. 1438-1451.

3. Audet Charles, J. E. Dennis Jr. Analysis of Generalized Pattern Searches // *SIAM Journal on Optimization*. – 2003. – Vol. 13(3). – Pp. 889-903. – DOI: 10.1137/S1052623400378742.

4. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.V., 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.

5. Kahaner D., Moler C., Nash S. Numerical Methods and Software. Upper Saddle River. – New Jersey: Prentice Hall, 1988. – 495 p. – DOI: 10.1137/1033033.

6. Fritsch F.N., Carlson R.E. Monotone Piecewise Cubic Interpolation // *SIAM Journal on Numerical Analysis*. – 1980. – Vol. 17(2). – Pp.238-246. DOI: 10.1137/0717021.

7. Rasmussen C.E., Williams C.K.I. Gaussian Processes for Machine Learning. – Cambridge: MIT Press, 2006 – 272 p. DOI: 10.1142/S0129065704001899.

8. Statistics and Machine Learning Toolbox. User's Guide. Math- Works: Documentation R. 2022a. – Math Works, 2022. – 10346 p.

Информация об авторах

А.Д. Головин – ведущий инженер, И.А. Пожидаев – ведущий инженер, И.В. Баскаков – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; А.В. Химченко – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. Golovin – Leading Engineer, I. Pozhidaev – Leading Engineer, I. Baskakov – Full Doctor of Agricultural Sciences, Professor; V. Orobinsky – Full Doctor of Agricultural Sciences, Professor; A. Khimchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

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): 21.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 22.04.2024