Тип статьи: научная
УДК 631.365.32: 546.214
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-76-89

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРА ОЧАГА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОЗОНА В ЗЕРНОВОМ ВОРОХЕ

Антон Дмитриевич Головин [1], Илья Алексеевич Пожидаев [2], Иван Васильевич Баскаков[3], Владимир Иванович Оробинский [4], Аркадий Васильевич Химченко [5]
[1,2,3,4,5] *Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, г. Воронеж, Россия*
[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. *Известно, что на современном этапе развития агропромышленного комплекса всё чаще используют процесс озонирования. Это экологически чистый метод обработки сельскохозяйственного сырья с целью его обеззараживания, дезодорации, дезинсекции, повышения ростовых качеств семян и т.д. Стоит отметить, что, несмотря на столь активное применение озона, остаётся до конца не изученный вопрос, как газ распространяется в зерне во время его обработки. В статье приведены результаты исследований по определению формы и размера очага расхождения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе. Экспериментально установлено, что озон в зерне расходится по форме приближенной к эллипсоиду. Размер очага зависит от времени насыщения и, как следствие, полученной дозы озонной обработки. С увеличением продолжительности эксперимента в большей степени увеличивается радиус эллипсоида, чем его высота. По результатам экспериментальных исследований в программе Matlab построена модель поведения озона в зерне в зависимости от режимов его обработки. Используя регрессии на основе процессов Гаусса спрогнозированы форма и размер очага распространения озоновоздушной смеси в зерне при изменении времени озонирования. Подбор параметров модели осуществляется на основе оптимизации Байеса в приложении Regression Learner из Statistics and Machine Learning Toolbox прикладного программного пакета Matlab. Электронная программа позволяет производить оптимизацию гиперпараметров и получать доверительные интервалы для предсказанных значений. Результаты исследований позволяют прогнозировать поведение озона в зерне, что необходимо для определения количества подающих сопл газа внутри зернохранилища любого объёма.*

Ключевые слова: *озон, озоновоздушная смесь, распространение озона в зерне.*

THEORETICAL PREREQUISITES FOR DETERMINING THE SHAPE AND SIZE OF THE OZONE DISTRIBUTION CENTER IN A GRAIN HEAP

Anton Golovin [1], 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, Russia*
[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. *It is known that at the present stage of development of the agro-industrial complex, the ozonation process is increasingly being used. This is an environmentally friendly method of processing agricultural raw materials in order to disinfect, deodorize, disinsect, increase the growth qualities of seeds, etc. It is worth noting that, despite such an active use of ozone, the question remains not fully*

understood how the gas spreads in the grain during its processing. The article presents the results of research to determine the shape and size of the source of the ozone-air mixture divergence in the grain heap. It has been experimentally established that the ozone in the grain diverges in a shape close to an ellipsoid. The size of the lesion depends on the saturation time and, as a result, the received dose of ozone treatment. As the duration of the experiment increases, the radius of the ellipsoid increases more than its height. Based on the results of experimental studies in the Matlab program, a model of the behavior of ozone in grain is constructed depending on its processing modes. Using regressions based on Gauss processes, the shape and size of the distribution center of the ozone-air mixture in the grain were predicted with a change in the ozonation time. The selection of model parameters is based on Bayesian optimization in the Regression Learner application from the Statistics and Machine Learning Toolbox of the Matlab application software package. The electronic program allows you to optimize hyperparameters and obtain confidence intervals for predicted values. The research results make it possible to predict the behavior of ozone in grain, which is necessary to determine the number of gas supply nozzles inside a granary of any volume.

Keywords: *ozone, ozone-air mixture, ozone distribution in grain.*

Для цитирования: Головин А.Д., Пожидаев И.А., Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченко А.В. Теоритические предпосылки определения формы и размера очага распространения озона в зерновом ворохе // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 76-89. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-76-89.

For citation: Golovin A., Pozhidaev I., Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenko A. Theoretical prerequisites for determining the share and size of the ozone distribution center in a grain heap. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 76-89. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-76-89.

Введение. В последние годы в России наблюдается стабильной рост урожайности зерновых культур. Из-за этого увеличивается давление на отрасль сельского хозяйства, поскольку требуется большее количество современных зернохранилищ. Для того чтобы зерно при хранении не теряло своих свойств, необходимо своевременно и равномерно проводить его обработку. На сегодняшний день известно несколько способов поддержания качества хранящегося зернового материала. Стоит отметить, что использование некоторых методов способствует угнетению флоры и фауны, могут негативно повлиять на ростовые процессы семян или привести к ухудшению экологической ситуации, а также нанести непоправимый вред здоровью человека и сельскохозяйственных животных. На современном этапе развития человечество старается уйти от использования в технологических процессах вредных химических веществ. Решением данного вопроса может быть применение экологически чистых методов обработки сырья сельскохозяйственной продукции. К одному из безопасных способов консервации можно отнести процесс озонирования [1, 2, 3].

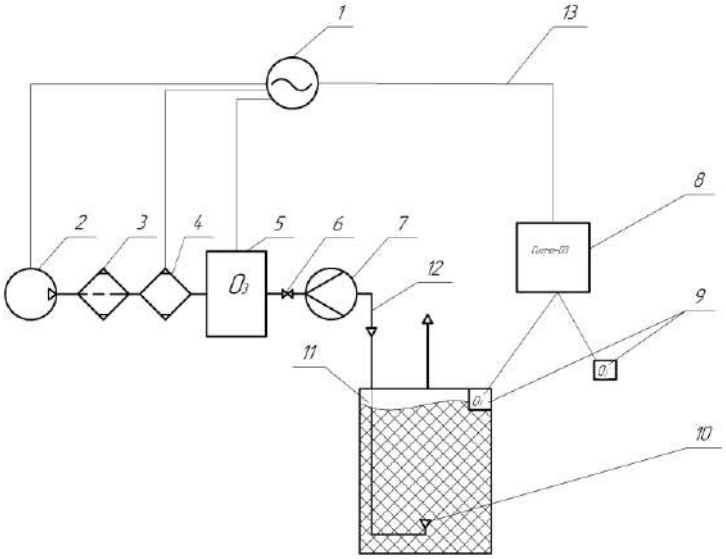
Озон имеет высокие окислительные, фунгицидные и бактерицидные свойства, которые позволяют использовать его в разных сферах деятельности [4, 5, 6]. Его применяют для обеззараживания воды, помещений, продуктов питания, а также в терапевтических целях в медицине. В сельском хозяйстве озон используют для дезинфекции складов, дезинсекции зерна, предпосевной обработки семян, полива сельскохозяйственных культур и т.д. Одним из главных преимуществ газа является то, что его избыточное количество быстро распадается до молекулярного кислорода и при воздействии на зерновой материал он не оставляет никаких вредоносных соединений [7, 8].

У озонной обработки, как и у любого другого способа, имеются свои недостатки. Главной отрицательной стороной озонирования является то, что при высоких концентрациях озон способен нанести вред здоровью человека или животных. Именно этот фактор является тормозящим при использовании данного технологического процесса в сельском хозяйстве. Однако на сегодняшний день благодаря развитию и совершенствованию инженерно-технического оборудования применение озоновоздушной смеси является достаточно безопасным.

Целью исследований является получение модели, описывающей закономерность распространения озона в зерновом ворохе при различных режимах озонной обработки.

Материалы и методы.

В Воронежском госагроуниверситете были проведены экспериментальные исследования, направленные на определение зоны распространения озона в зерновом ворохе. Для этого была разработана лабораторная установка, представленная на рисунке 1.



1 – источник переменного тока; 2 – компрессор; 3 – фильтр; 4 – осушитель воздуха; 5 – озонатор; 6 – запорный вентиль; 7 – расходомер; 8 – газоанализатор; 9 – датчики концентрации газа; 10 – сопло; 11 – ёмкость; 12 – газопроводы, 13 – электрические линии

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки по озонированию зерна

Лабораторная установка состоит из источника переменного тока 1, воздушного компрессора 2, фильтра 3, осушителя воздуха 4, озонатора 5, расходомера 6, запорного вентиля 7, газоанализатора 8, датчиков 9, определяющих концентрацию озона, сопла 10, ёмкости 11 и газопроводов 12. Принцип действия следующий. Компрессор 2, осушитель воздуха 4, озонатор 5 и газоанализатор 8 по электролиниям 13 подключаются к сети переменного тока 1. При этом компрессор 2 засасывает воздух из окружающей среды и через фильтр 3 подает его в осушитель 4. Далее, обезвоженный воздушный поток поступает в озонатор 5, в котором обогащается озоном. Количество озоновоздушной смеси изменяется запорным вентилем 7. Пройдя расходомер 6, газ по газопроводу 12 поступает в ёмкость 11, в которой через сопло 10 подаётся в зерновой ворох. Концентрация озона в озоновоздушной смеси контролируется датчиками 9, связанными с газоанализатором 8, который регистрирует показания и выводит их на информационное табло.

Озон в озонаторе вырабатывается за счёт электрического разряда по схеме, представленной на рисунке 2. Из трёх молекул кислорода под действием высокочастотного тока получаются шесть атомов, которые при определённых условиях образуют две молекулы озона.

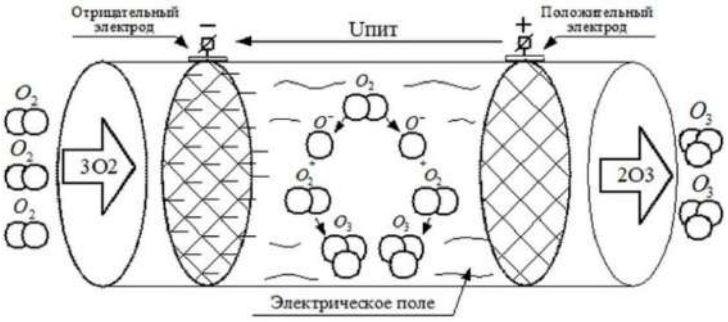


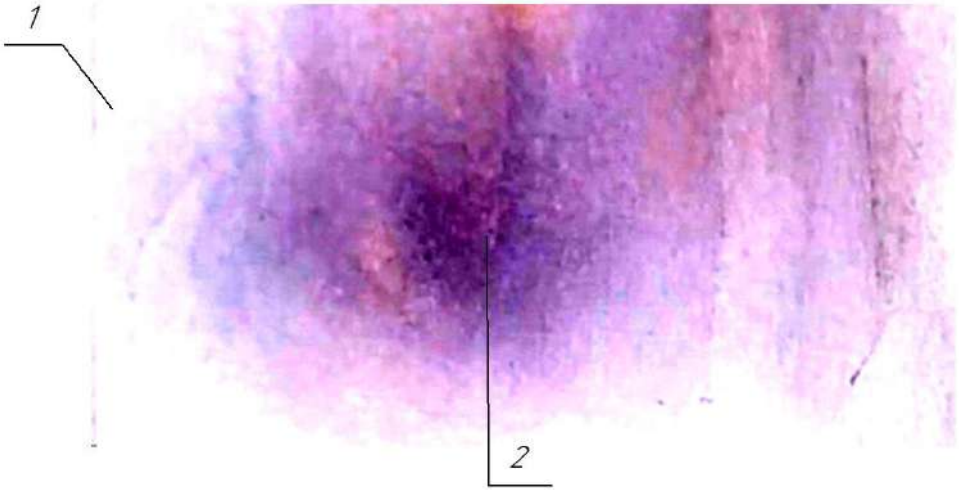
Рисунок 2 – Принцип получения озона в озонаторе

Для обнаружения озона использовали качественную йодокрахмальную реакцию

$$2KI + O_3 + H_2O = I_2 + 2KOH + O_2, \quad (1)$$

где KI – иодид калия;
O_3 – озон;
H_2O – вода;
I – молекулярный йод;
KOH – гидроксид калия;
O_2 – молекулярный кислород.

Результатом данной реакции является выделяемый йод, который окрашивает зону прохождения озона в характерный цвет. В процессе эксперимента фильтровальную бумагу пропитывали раствором крахмала с калием йодидом. Затем некоторое время подсушивали в тёмном месте, защищенном от попадания солнечных лучей. Далее, пропитанная бумага помещается в ёмкость, куда подаётся озоновоздушная смесь. При появлении озона индикатор окрашивается в фиолетовый цвет. Результат химической реакции представлен на рисунке 3.



1 – зона не подвергающаяся воздействию озона; 2 – зона качественной йодокрахмальной реакции в присутствии озона

Рисунок 3 – Результат проведения качественной йодокрахмальной реакции при взаимодействии с озоном на фильтровальной бумаге

Аналогичный эксперимент проводили в зерновом ворохе. Зерно пропитывали раствором крахмала с калия йодидом. Далее его погружали в экспериментальную ёмкость, куда подвали озоновоздушную смесь. Опыт проводили трижды, изменяя продолжительность обработки. В первом случае эксперимент длился 10 минут при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси 4,28 мг/м³. При этом доза озонной обработки составила 42,8 мин·мг/м^3, а расход рабочей смеси – 0,226 м^3. Во втором эксперименте время составило 20 минут, при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси 3,33 мг/м³. При этом доза озонной обработки равнялась 66,6 мин·мг/м^3, а расход рабочей смеси – 0,4 м^3. В третьем эксперименте опыт длился 30 минут при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси 3,54 мг/м³. При этом доза озонной обработки составила 106,2 мин·мг/м^3, а расход рабочей смеси – 0,617 м^3.

Изменение концентрации озона в озоновоздушной смеси во время экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение концентрации озона в озоновоздушной смеси во время опыта

№ опыта	Время озонной обработки, мин	Концентрация озона в озоно-воздушной смеси, мг/м³	Средняя концентрация озона в озоно-воздушной смеси, мг/м³	Доза озонной обработки, мин·мг/м³	Средне-интегральная концентрация озона в озоно-воздушной смеси за опыт, мг/м³	Средне-интегральная доза озонной обработки*, мин·мг/м³
1	2	3,26	4,28	42,8	3,768	37,68
	4	3,26				
	6	4,82				
	8	5				
	10	5				
2	5	2,18	3,33	66,6	2,705	54,10
	10	3,32				
	15	2,82				
	20	5				
3	5	1,84	3,54	106,2	3,3067	99,20
	10	3,22				
	15	3,92				
	20	5				
	25	4,48				
	30	2,76				

* – среднеинтегральная доза озонной обработки определялась численным интегрированием методом трапеций.

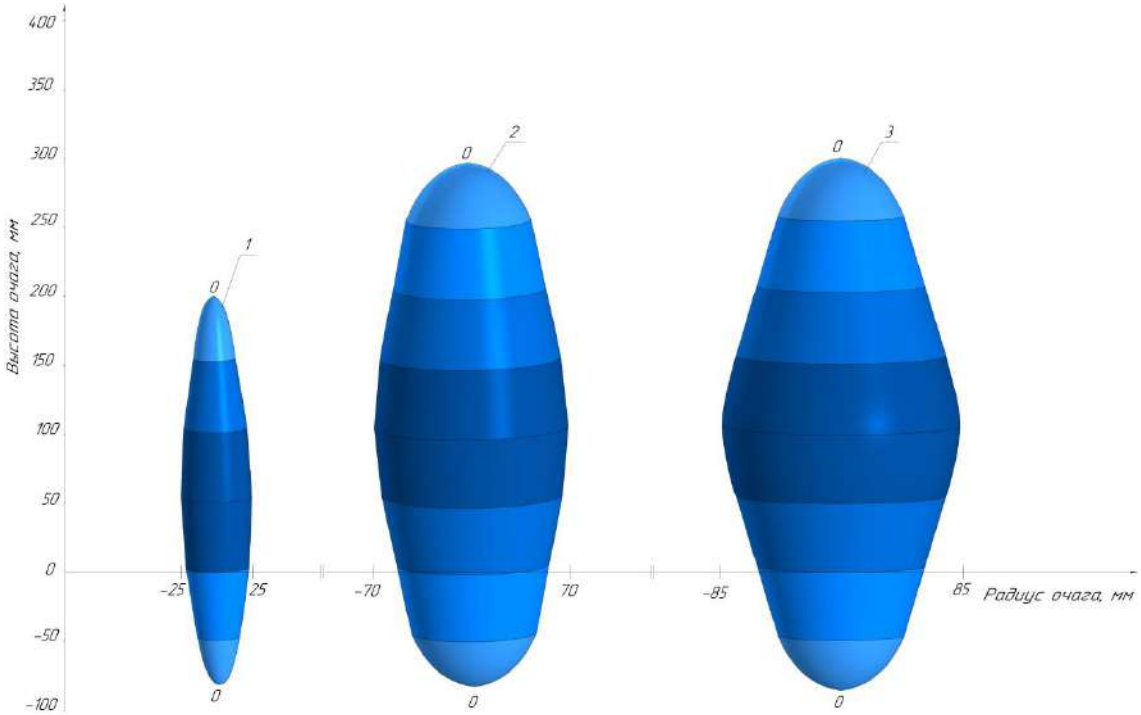
Следующим этапом экспериментов было определение зон распространения озона в зерновом ворохе, которые оценивали по появившемуся пятну, т.е. зёрен, окрашенных в фиолетовый цвет, выделившимся согласно уравнению (1) йодом. Для этого зерно изымали из ёмкости слоями с шагом 50 мм. При этом определяли радиус окрашиваемых пятен, поскольку они были приближены к окружности. Данный показатель измеряли по крайней точке окрашенного зерна с точностью до 1 мм. Изменение радиуса очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от высоты снятого слоя и времени обработки представлены в таблице 2. Слой зерна, в котором находится подающее сопло, обозначено за ноль. Нижерасположенные части имеют отрицательные значения, а выше – положительные.

Таблица 2 – Изменение радиуса очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от высоты снятого слоя и времени обработки

Время опыта, мин	Высота, мм	Радиус, мм
10	-80	0
	-50	14
	0	23
	50	25
	100	22
	150	16
	200	0
20	-85	0
	-50	45
	0	55
	50	65
	100	70

20	150	65
	200	55
	250	44
	295	0
30	-90	0
	-50	47
	0	60
	50	75
	100	85
	150	75
	200	60
	250	46
	300	0

По результатам исследований посредством программы КОМПАС 3D получены зоны распространения озона в зерновом ворохе. Визуализированная 3D модель расхождения газа в слое зерна представлена на рисунке 4. Она представляет собой эллипсоид, разных размеров. Причём озон от места подачи распространяется не только вверх, но и немного вниз.

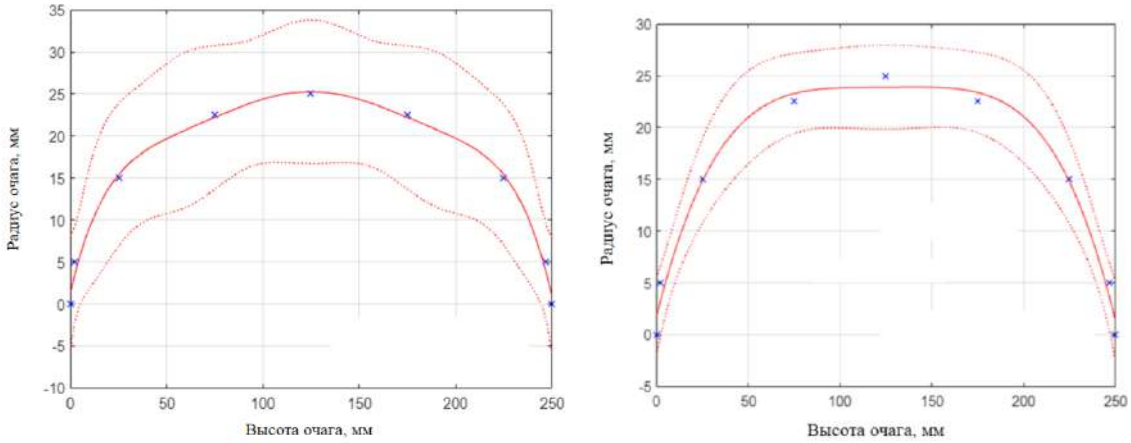


1 – 10 минут озонной обработки; 2 – 20 минут озонной обработки; 3 – 30 минут озонной обработки
Рисунок 4 – Очаги распространения озона в зерновом ворохе при разных режимах озонирования

Визуализированная 3D модель позволяет сравнить очаги распространения озона в зерновом ворохе при разных режимах озонной обработки. При помощи функций массо-центровочных характеристик (МЦХ) программы КОМПАС 3D, были получены объёмы фигур, которые соответствуют зонам распространения озона в зерне при разном времени эксперимента. Стоит отметить, что окрашенные зёрна имели разные оттенки, что говорит о различии условий протекания качественной йодокрахмальной реакции, вызванные изменяющейся концентрацией озона по зерновым слоям. Следовательно, более тёмные пятна, получали большую дозу озонной

обработки. Очевидно, что в месте подачи озоновоздушной смеси в зерновой ворох её скорость движения высокая и поэтому газ быстро проходит вверх через зерновые слои, лишь немногим увеличиваясь в диаметре. При этом в середине эллипсоида создаётся эпицентр с наивысшей концентрацией озона. Далее скорость движения газа снижается и верхние зерновые слои получают меньшую дозу озонной обработки и поэтому слабее окрашиваются. Эллипсоиды имеют максимальные диаметры в поперечном сечении в местах с наибольшей концентрацией озона в озоновоздушной смеси и по мере удаления от эпицентра уменьшаются в размерах до тех пор, пока не станут равными нулю. В конечном итоге на некотором удалении от места подачи газа действие озона прекращается.

Поиск характера изменения высоты эллипсоида в зависимости от его радиуса осуществлялся с помощью инструментов Matlab компании MathWorks. При этом линейная регрессия в виде полинома не дала удовлетворительных результатов. Как видно на рисунке 5 полиномы четвёртой и даже шестой степени, описывающие полученные экспериментальные результаты при экспозиции 10 минут имеют слишком большой доверительный интервал и не достаточно описывают математическое ожидание величины радиуса.



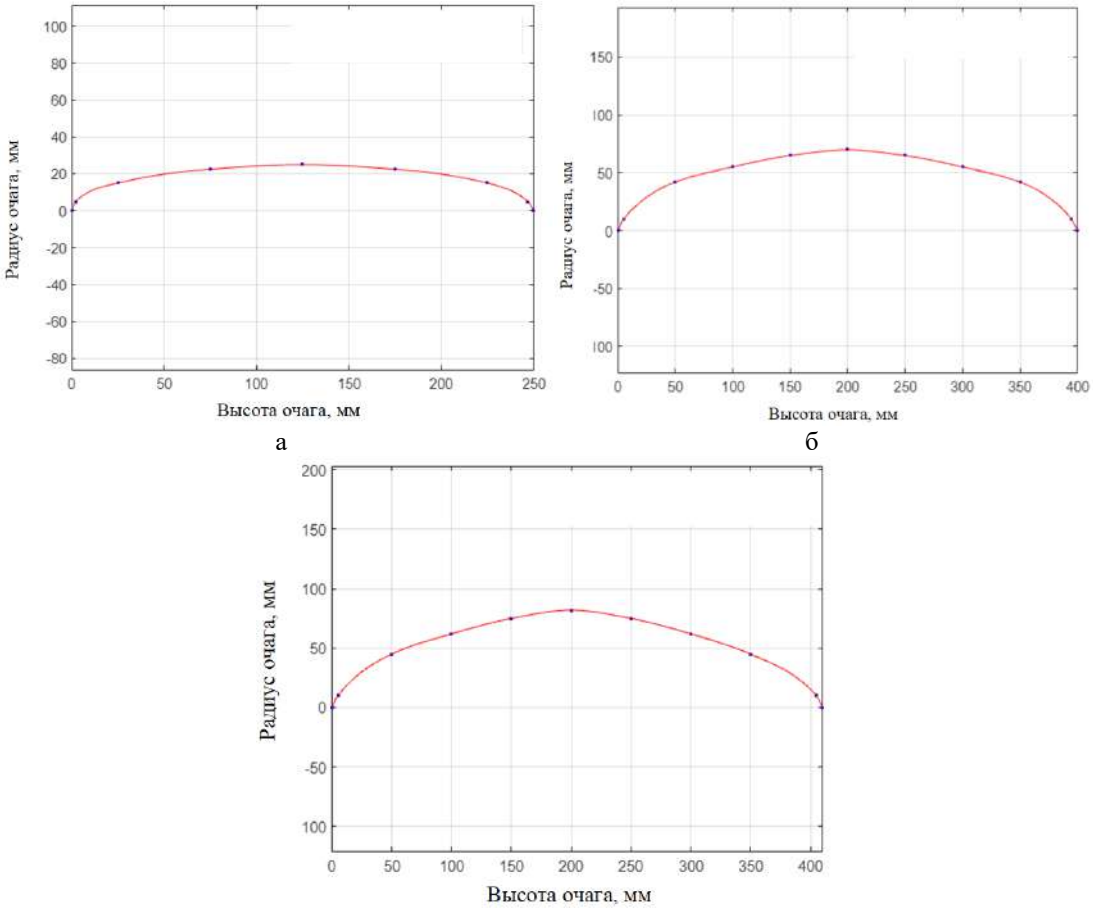
а б

а – аппроксимация полином 4 степени; б – аппроксимация полином 6 степени
····· – доверительный интервал

Рисунок 5 – Результаты аппроксимации полиномом результатов экспериментальных исследований изменения высоты эллипсоида в зависимости от его радиуса при 10 минутной озонной обработке

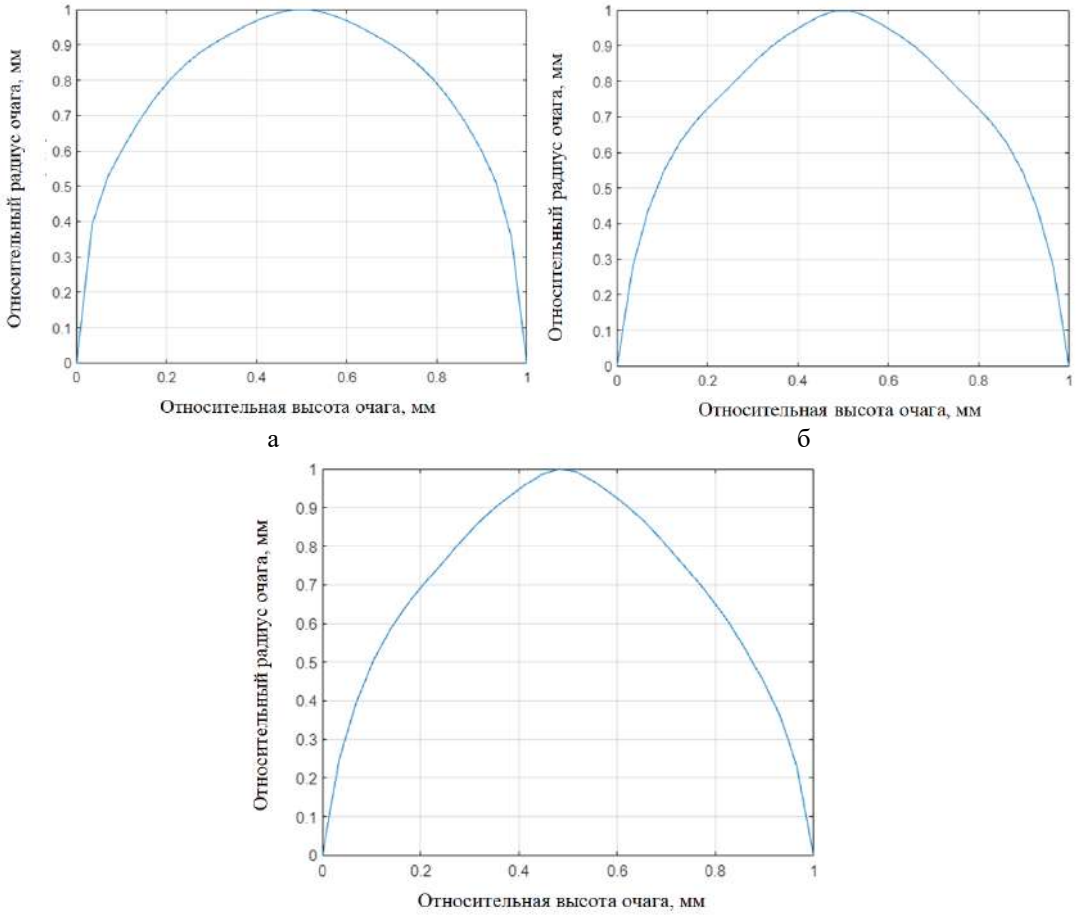
Подобный результат получен при разных степенях полинома. Аналогичная картина наблюдалась при попытке выполнить аппроксимацию разными нелинейными функциями. Поэтому на данном этапе для получения промежуточных значений с максимальной точностью, выбор был остановлен на интерполяции с максимальным соблюдением формы.

При интерполяции наилучший результат дал метод PCHIP – кусочный кубический интерполяционный полином Эрмита [9]. Применение данного инструмента позволило получить более гладкий график изменения высоты эллипсоида в зависимости от его радиуса за счёт использования кусочно-полиномиальной функции более высокого порядка. После обработки результатов получились зависимости, представленные на рисунке 6.



а – при 10 минутной обработке; б – при 20 минутной обработке; в – при 30 минутной обработке
Рисунок 6 – Результат интерполяции взаимосвязи радиуса озонного эллипсоида от его высоты методом PCHIP

На данном этапе исследования определяли форму объема обработанного зернового вороха. Она может быть описана закономерностью взаимосвязи относительных величин. Фактически мы пришли к нормированию высоты озонного эллипсоида и его радиуса. Поскольку процесс распространения озона в ворохе имеет случайные составляющие, а также на основе неудачного поиска подходящих уравнений линейной и нелинейной регрессии было принято решения о поиске модели описания формы обработанного объема на основе Гауссовых процессов [11]. Для этого желательно иметь большее количество точек. Поэтому модели на основе сплайнов использовались для получения дополнительных тридцати точек для каждого опыта с одинаковым шагом. Далее эти значения нормировались, путем деления фактического размера на максимальный параметр. В относительных (нормированных) величинах зависимости изменения радиуса эллипсоида от его высоты имеют вид, показанный на рисунке 7.



а – при 10 минутной обработке; б – при 20 минутной обработке; в – при 30 минутной обработке
Рисунок 7 – Результат интерполяции в относительных размеров очага распространения озона в зерновом ворохе

Из рисунка 7 видно, что при увеличении времени озонной обработки во всех опытах средняя часть расширяется и становится в середине вытянутой. В конечном итоге необходимо знать зависимость формы очага распространения озона от продолжительности озонирования, то есть она должна быть описана как зависимость относительного радиуса от относительной высоты и времени обработки. Предварительный анализ показал, что следует использовать регрессию на основе Гауссовых процессов. Однако данная методология достаточно обширна и важно сделать правильный выбор в отношении видов функций ядра и их взаимосвязи. То есть следует определится с гиперпараметрами модели. Результат интерполяции относительных размеров очага распространения озона в зерновом ворохе при двухфакторной зависимости представлен на рисунке 8.

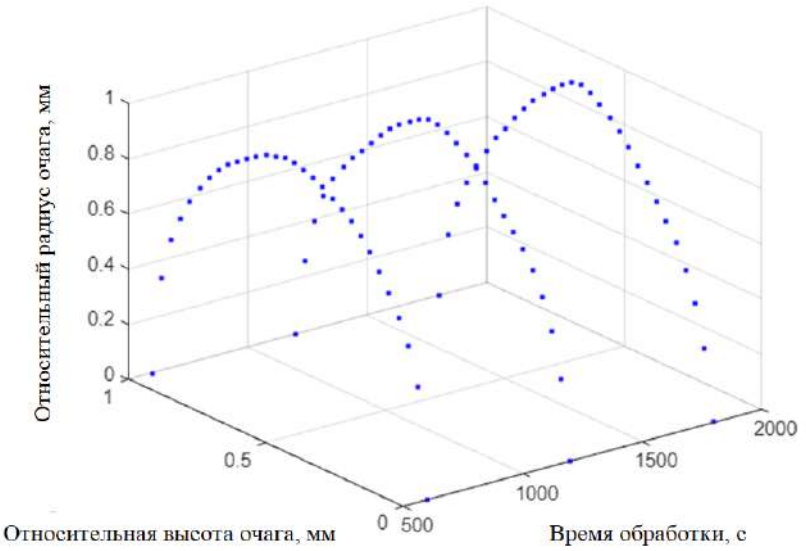


Рисунок 8 – Результат интерполяции относительных размеров очага распространения озона при двухфакторной зависимости

Анализируя рисунок 8 можно сказать, что полученная математическая модель позволяет в любом диапазоне значений оценить форму очага распространения озона в нормированных величинах в зависимости от времени обработки.

Подбор параметров модели осуществлялся на основе оптимизации Байеса в приложении Regression Learner из Statistics and Machine Learning Toolbox прикладного программного пакета Matlab [12]. По умолчанию приложение Регрессия Learner может выполнять настройку гиперпараметров с помощью байесовской оптимизации [10]. Цель байесовской оптимизации и оптимизации в целом – найти точку, которая минимизирует целевую функцию. В контексте настройки гиперпараметров в приложении точка представляет собой набор значений гиперпараметров, а целевая функция – это функция потерь или среднеквадратическая ошибка (MSE). В результате оптимизации было получено, наилучшее решение на основе экспоненциального ядра с автоматическим определением релевантности, описываемой зависимостью

$$k(x_i, x_j \mid \theta) = \sigma_f^2 e^{-r}, \tag{2}$$

где k – ядро / ковариационная функция;
x_i, x_j – переменные;
θ – вектор параметризации;
σ_f^2 – дисперсия экспериментальных данных;
e – основание натурального логарифма;
r – показатель степени.

При этом показатель степени r рассчитывается по формуле

$$r = \sqrt{\sum_{m=1}^{d} \frac{(x_{jm} - x_{jm})^2}{\sigma_m^2}}, \tag{3}$$

где d – количество описываемых участков;
m – номер точки на участке данных;
σ_m^2 – дисперсия экспериментальных данных на участке.

Тогда в общем виде функция ковариации будет выглядеть следующим образом:

$$k(x_i, x_j \mid \theta) = \sigma_f^2 e^{-\sqrt{\sum_{m=1}^{d} \frac{(x_{jm} - x_{jm})^2}{\sigma_m^2}}}. \tag{4}$$

Результаты и их обсуждение. Полученные значения гиперпараметров позволили получить достаточно точную математическую модель регрессии на основе процессов Гаусса представленной на рисунке 9.

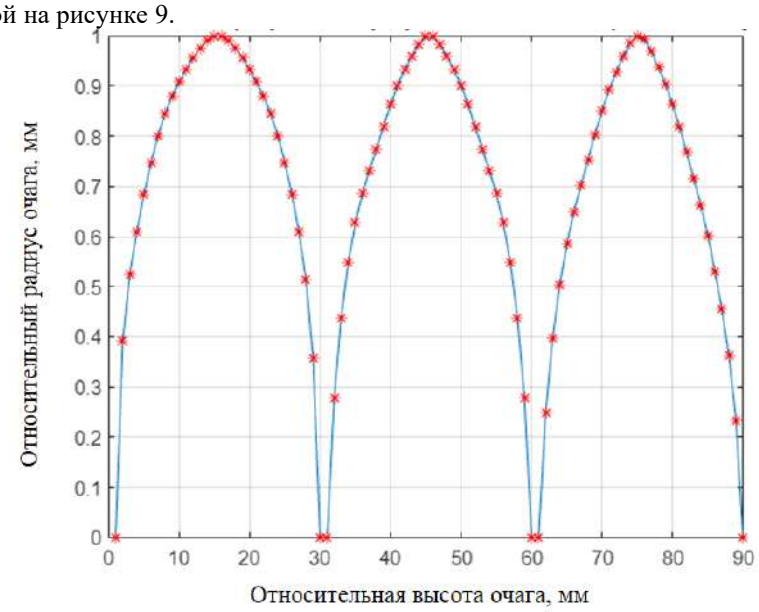


Рисунок 9 – Сопоставление результатов регрессии на основе процессов Гаусса

Для проверки корреляции предсказаний модели и исходных точек был проведен анализ на основе линейной регрессии представленной на рисунке 10.

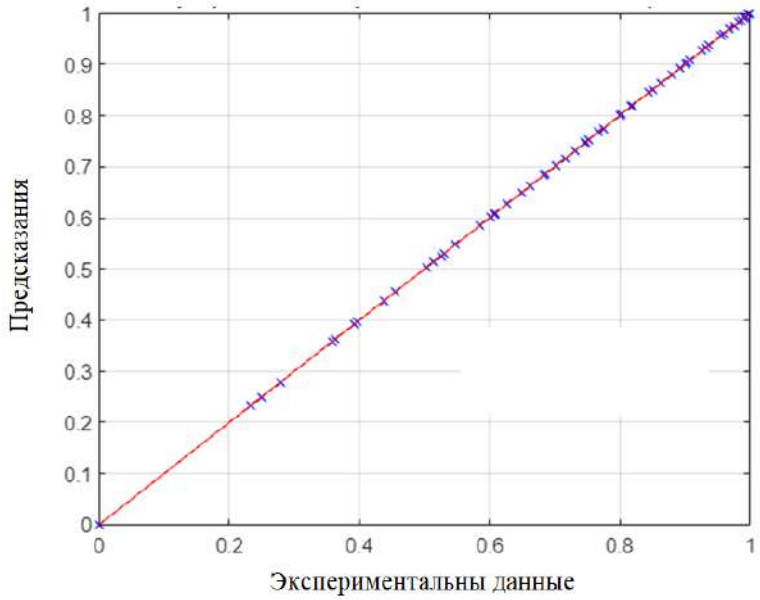


Рисунок 10 – Линейная регрессия экспериментальных данных и предсказаний

Из рисунка 10 видно, что почти все точки лежат на одной прямой. Об этом свидетельствует и коэффициент детерминации R^2, который составил 0,99998.

Для дальнейших исследований важно понимать с какой точностью модель будет предсказывать то, как меняется форма очага распространения озона при разном времени обработки. Стоит отметить, что одной из положительных черт при использовании Гауссовых процессов является возможность

получения доверительного интервала для предсказанных значений. На рисунке 11 показана поверхность в зоне эксперимента, предсказания при минимальном времени обработки и 40 минутной обработке. Точки в виде «+» показывают 95 % доверительный интервал.

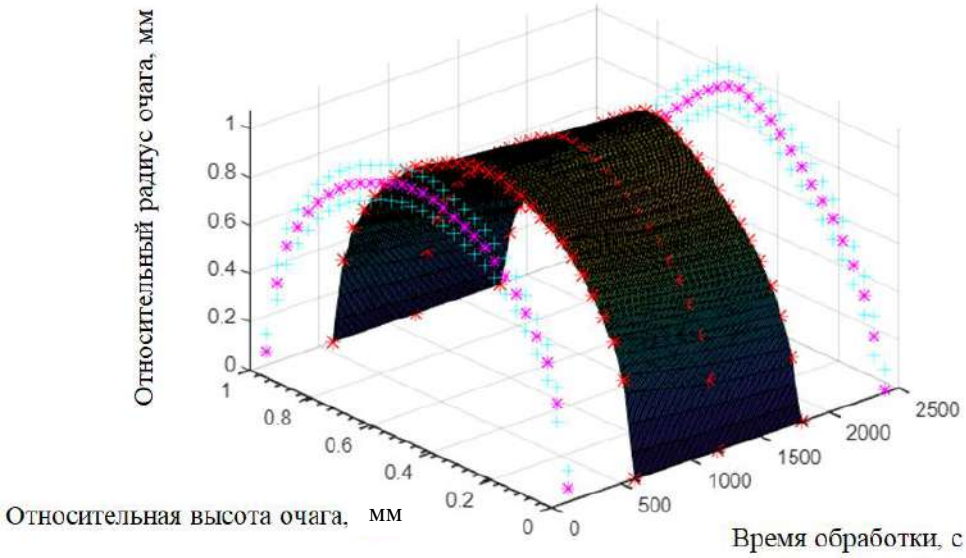


Рисунок 11 – Общий вид формы распространения очага озона в зерновом ворохе с предсказаниями и доверительным интервалом

Очевидно, что вероятность ошибки при предсказаниях невелика, о чем свидетельствует узкий доверительный интервал, а данная модель может быть использована в дальнейших исследованиях.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод о том, что на данном этапе поставленная цель достигнута. В результате исследований удалось получить форму очага распространения озона в зерновом ворохе при разной продолжительности операции. Получена математическая модель изменения его формы в зависимости от времени обработки в виде регрессии на основе Гауссовых процессов. Данный алгоритм позволит прогнозировать зону расхождения озона в зерновом ворохе при различных режимах озонирования, что послужит основой для расчёта количества подающих газ сопл в зернохранилище любого объёма, а также оптимизации их расположения.

Список источников

1. Aboltins A., Palabinskis J., Lauva A. Grain active ventilation using ozonized air // Acta Horticulturae – 2010. – Vol. 858(69). – Pp. 449-455. DOI:10.17660/ActaHortic.2010.858.69.

2. Kells S.A., Mason L.J., Mayer D.E., Voloshuk K.P. Efficiency and fumigation characteristics of ozone in stored corn // Journal of Stored Products Research. – 2001. – Vol. 37(4). – Pp. 371-382. DOI: 10.1016/s0022-474x(00)00040-0.

3. Mendes F., Mayer D.E., Mason L.J., Voloshuk K.P. The penetration of ozone into the columns of stored grain and the effect on the chemical composition and processing performance // Journal of Stored Products Research. – 2003. – Vol. 39(1) – Pp. 33-44. DOI:10.1016/s0022-474x(02)00015-2.

4. Tiwari B.K., Brennan C.S., Curran T., Gallagher E., Cullen P.J., O' Donnell C.P. Application of ozone in grain processing // Journal of Cereal Science. – 2010. – Vol. 51(3). – Pp. 248-255. DOI: 10.1016/j.jcs.2010.01.007.

5. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.V., Chernyshov A.V. Studies of the ozonation process when drying grain // IOP Conference Series. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (Russia, Voronezh, October 17-18, 2019). – IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 422. – № 012009. – 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/422/1/012009.

6. 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.

7. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.V., Chernyshov A.V., Gulevsky V.A. Modes of treating pre-sowing grain seeds with ozone // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on World Technological Trends in Agribusiness (Russia, Omsk, 29-30 March, 2021). – IOP Publishing Ltd, 2022. – Vol. 954. – №012009. – 5 p. DOI: 10.1088/17551315/954/1/012009.

8. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.V., 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.

9. 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.

10. Neal R.M. Bayesian Learning for Neural Networks. – London: Springer Limited London, 2012. – 204 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0745-0.

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

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

References

1. Aboltins A., Palabinskis J., Lauva A. Grain active ventilation using ozonized air // Acta Horticulturae – 2010. – Vol. 858(69). – Pp. 449-455. DOI:10.17660/ActaHortic.2010.858.69.

2. Kells S.A., Mason L.J., Mayer D.E., Voloshuk K.P. Efficiency and fumigation characteristics of ozone in stored corn // Journal of Stored Products Research. – 2001. – Vol. 37(4). – Pp. 371-382. DOI: 10.1016/s0022-474x(00)00040-0.

3. Mendes F., Mayer D.E., Mason L.J., Voloshuk K.P. The penetration of ozone into the columns of stored grain and the effect on the chemical composition and processing performance // Journal of Stored Products Research. – 2003. – Vol. 39(1). – Pp. 33-44. DOI:10.1016/s0022-474x(02)00015-2.

4. Tiwari B.K., Brennan C.S., Curran T., Gallagher E., Cullen P.J., O' Donnell C.P. Application of ozone in grain processing // Journal of Cereal Science. – 2010. – Vol. 51(3). – Pp. 248-255. DOI: 10.1016/j.jcs.2010.01.007.

5. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.V., Chernyshov A.V. Studies of the ozonation process when drying grain // IOP Conference Series. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (Russia, Voronezh, October 17-18, 2019). – IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 422. – №. 012009. – 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/422/1/012009.

6. 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.

7. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.V., Chernyshov A.V., Gulevsky V.A. Modes of treating pre-sowing grain seeds with ozone // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on World Technological Trends in Agribusiness (Russia, Omsk, 29-30 March, 2021). – IOP Publishing Ltd, 2022. – Vol. 954. – №012009. – 5 p. DOI: 10.1088/17551315/954/1/012009.

8. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.V., 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.

9. 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.

10. Neal R.M. Bayesian Learning for Neural Networks. London: Springer Limited London, 2012. – 204 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0745-0.

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

12. 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, доцент; 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, Associate 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): 15.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 22.02.2024