

Тип статьи: научная
УДК 631.243.33:546.214
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-4-114-126

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОЗОНИРОВАНИЯ ВЛАЖНОГО ЗЕРНА ПЕРЕД СУШКОЙ

*Иван Васильевич Баскаков*¹, *Владимир Иванович Оробинский*²,
*Аркадий Васильевич Химченко*³, *Владислав Юрьевич Кирмасов*⁴, *Ольга Васильевна Чернова*⁵

^{1, 2, 3, 4} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
г. Воронеж, Российская Федерация

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

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

² main@agroeng.vsau.ru

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

⁴ vlad.kirmasov@mail.ru

⁵ chernovaol2012@yandex.ru

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

Реферат. *Озон при сушке зерна вступает в ряд химических реакций, которые способствуют увеличению парциального давления внутри зерна и изменению градиента температуры, что ускоряет парообразование и повышает коэффициент диффузии влаги. Практическое применение озоноздушной смеси в качестве сушильного агента не налажено из-за сложностей с безопасностью процесса, отсутствием обоснованных режимов озонной обработки, несовершенством конструкции озонаторов. Определяли целесообразность применения процесса озонирования при сушке на основе экспериментов по изменению влажности зерна при использовании озоноздушной смеси в качестве сушильного агента. Предложено модернизировать имеющиеся зерносушильные комплексы, дооснастив буферные силосы системой озонирования. Разработан способ сушки зернового материала, состоящий из двух последовательно выполняемых операций: предварительной озонной обработки влажного зерна и последующей его сушки на серийной зерносушилке. Были проведены три эксперимента по определению влияния предварительного озонирования на процесс влагоотделения при нагревании зернового вороха. Установлено, что применение предварительной озонной обработки влажного зерна в буферной ёмкости перед зерносушилкой с концентрацией озона 5, 7,5 и 15,3 мг/м³ позволило увеличить относительную скорость сушки в 1,51-1,84 раза. Предварительное озонирование влажного зерна целесообразно, потому что не только сокращает расходы на доведение зерна до кондиционного состояния по влажности, но и положительно сказывается на качестве просушиваемого материала.*

Ключевые слова: сушка зерна, озон, целесообразность озонирования, эффективность.

THE EXPEDIENCY OF USING PRE-OZONATION OF WET GRAIN BEFORE DRYING

*Ivan Baskakov*¹, *Vladimir Orobinsky*², *Arkady Himchenko*³, *Vladislav Kirmasov*⁴,
*Olga Chernova*⁵

^{1, 2, 3, 4} Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

⁵ Municipal budgetary educational institution Paninskaya secondary school, Panino, Paninsky district
Voronezh region, Russia

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

² main@agroeng.vsau.ru

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

⁴ vlad.kirmasov@mail.ru

⁵ chernovaol2012@yandex.ru

Abstract. When drying grain, ozone enters into a number of chemical reactions that contribute to an increase in the partial pressure inside the grain and a change in the temperature gradient, which accelerates vaporization and increases the moisture diffusion coefficient. Practical application of the ozone-air mixture as a drying agent has not been established due to difficulties with process safety, the lack of substantiated ozone treatment modes, and imperfect ozonizer designs. The feasibility of using the ozonation process during drying was determined based on experiments on changing grain moisture using the ozone-air mixture as a drying agent. It was proposed to modernize the existing grain drying complexes by retrofitting the buffer silos with an ozonation system. A method for drying grain material has been developed that consists of two sequentially performed operations: preliminary ozone treatment of wet grain and its subsequent drying in a serial grain dryer. Three experiments were conducted to determine the effect of preliminary ozonation on the moisture separation process when heating a grain heap. It was found that the use of preliminary ozone treatment of wet grain in a buffer tank before the grain dryer with an ozone concentration of 5, 7.5 and 15.3 mg/m³ made it possible to increase the relative drying rate by 1.51-1.84 times. Preliminary ozonation of wet grain is advisable because it not only reduces the costs of bringing the grain to a conditioned state in terms of moisture, but also has a positive effect on the quality of the dried material.

Keywords: grain drying, ozone, feasibility of ozonation, efficiency.

Для цитирования: Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченков А.В., Кирмасов В.Ю., Чернова О.В. Снижение жёсткости оросительной воды озонирования // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 70, № 4. С. 114-126. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-114-126>.

For citation: Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenkov A., Kirmasov V., Chernova O. Reducing irrigation water hardness by ozonation. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 70(4): 114-126. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-114-126>.

Введение. Сушка является самой энергоёмкой операцией при производстве зерна. При неблагоприятных погодных условиях или поздних сроках созревания культуры влажность зерна в период уборки имеет значения выше кондиционных 13...14%. В связи с этим свежесобранное зерно необходимо сушить, иначе заложить его на хранение не получится, так как он испортится. При этом затраты на доведение зерна до кондиционного состояния по влажности превышают половину от суммарных затрат при производстве культуры. В настоящее время есть много различных конструкций зерносушилок. Однако эффективность их работы достаточно низкая в связи с высокой теплоёмкостью и низкой теплопроводностью зерна. Поэтому учёные и производственники всячески стараются улучшить конструкцию зерносушилок, сократив потери тепла, интенсифицировав процесс влагоотделения, усовершенствовав технологический процесс работы оборудования и т.д.

Одним из наиболее перспективных способов ослабления связи молекул воды с органическими компонентами зерна является процесс озонирования. Озон способствует расширению межклеточных мембран и облегчает выход на поверхность зерновки влаги из внутренних слоёв. В результате молекулы воды находятся в свободном состоянии. Это значительно снижает затраты энергии, необходимой для отвода влаги из зерна. Однако применение озоноздушной смеси в качестве сушильного агента, несмотря на доказанную эффективность [1-3], имеет массу недостатков, вызванных повышенной опасностью газа для здоровья человека, повышенным распадом озона при нагревании, невозможностью применения на некоторых типах зерносушилок и т.д. [4-5]. Поэтому был предложен способ сушки зерна и семян, в котором озонная обработка влажного зернового вороха проводится в буферном силосе перед сушкой. Подобные накопительные ёмкости уже имеются в конструкции многих зерносушильных комплексов, поэтому не потребуются сложной реконструкции. В данный момент буферные силоса используются для отволаживания зерна, создания партии сушки, необходимой для полной

загрузки зерносушилки, разделения продукта по качеству, сортам, влажности и т.д. Дооснащение данных накопительных ёмкостей системой озонирования достаточно простое техническое решение и позволит расширить их функционал. Время нахождения влажного зерна внутри силоса достаточное, чтобы обеспечить необходимую продолжительность предварительной озонной обработки. При этом данные ёмкости достаточно герметичные, что снижает потери газа и уменьшает вероятность негативного воздействия на человека. Кроме того, известны катализаторы разлагающие озон, которыми можно оснастить места возможных утечек. Поэтому на данный момент уровень развития науки и техники позволяет безопасно и эффективно использовать все преимущества процесса озонирования. В связи с вышеизложенным исследования, направленные на интенсификацию процесса сушки влажного зерна за счёт использования озонозоооздушной смеси, являются актуальными и имеют перспективы практического применения.

Возможность использования предварительного озонирования влажного зерна перед сушкой была доказана серией экспериментов [1, 6]. Предложенный способ имеет признаки интеллектуальной собственности и был запатентован [7]. Однако требуются дополнительные исследования для определения режимов озонной обработки, эффективности её применения, разработки конструкции зерносушильного комплекса и т.д. Целью данной статьи является определение целесообразности применения предварительного озонирования влажного зерна перед сушкой.

Анализ состояния вопроса. Исследования озонозоооздушной смеси в качестве сушильного агента ведутся с 80-х годов прошлого века. Применение подогретого воздуха, обогащенного озоном, снижало расход топлива и повышало производительность зерносушилки до 50%. Это в 1,3...2,5 раза сокращало время операции и уменьшало затраты на доведение зерна до кондиционного состояния по влажности. При этом было установлено, что озонозоооздушная смесь поступает в зерновку согласно законам диффузии газов. Причём озон, будучи сильнейшим окислителем, вступает в ряд химических реакций. Вследствие чего, учёные отмечают снижение энергоёмкости процесса сушки до 60% [1]. Данный эффект объясняется увеличением парциального давления внутри зерна и изменением градиента температуры, которые способствуют ускорению парообразования и повышают коэффициент диффузии влаги. Молекулы воды группируются около атомарного кислорода, образовавшегося при распаде озона, и выдуваются озонозоооздушным потоком. Другими словами ион выступает в роли адсорбента, то есть поглотителя влаги.

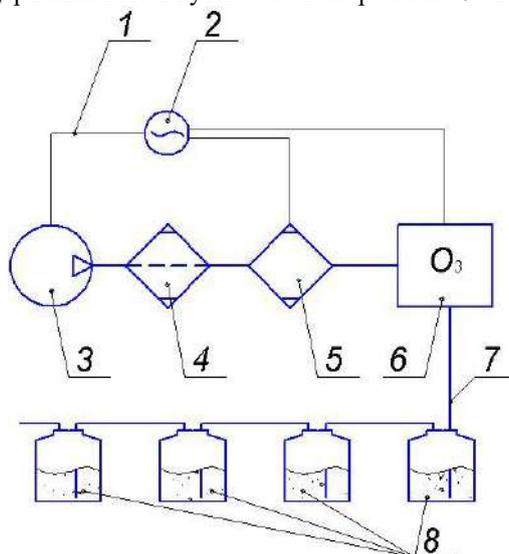
В настоящее время в современных зерносушилках нельзя снимать более 4...6% влаги за один цикл сушки. Это обуславливается резким снижением качества просушиваемого зерна. При использовании озонозоооздушной смеси отмечается возможность снижения температуры сушки без ущерба для производительности зерносушилки. При этом процент снимаемой влажности зерна за один цикл увеличивается без потери его качества. В результате отмечается, что применение озонозоооздушной смеси в качестве сушильного агента в колонковой зерносушилке *СЗК-15* позволило вместо двух циклов использовать один [1]. В связи с этим, в технологическом процессе не потребуется дополнительный подъём материала, что положительно скажется не только на экономических показателях, но и снизит повреждение зерна нориями и шнеками зерносушилки.

Следовательно, анализ ранее проведенных исследований показывает, что эффективность применения озонозоооздушной смеси при сушке зерна высокая. Однако более чем за 40 лет практическое применение так и не было налажено. Это связано с рядом нерешённых вопросов, таких как безопасность процесса, отсутствие обоснованных режимов озонной обработки, несовершенством конструкции озонаторов и т.д. Очевидно, что необходимо усовершенствовать технологический процесс, устранив недостатки использования озонозоооздушной смеси в качестве сушильного агента. Предложенный способ сушки зерна и семян зерновых культур, состоящий из двух этапов – предварительная озонная обработка влажного материала в буферной ёмкости и последующая сушка на серийной зерносушилке, позволяет усовершенствовать зерносушильные комплексы с приемлемыми затратами, сохранив преимущества применения процесса озонирования, минимизировав недостатки данной технологии.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели в работе использовались лабораторные исследования, основанные на активном эксперименте, с последующей обработкой

результатов методами математической статистики. В частности, использовался регрессионный и дисперсионный анализ.

Вначале перед сушкой необходимо провести озонную обработку влажного зерна. Для этого в ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ была изготовлена лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 1. Она состоит из воздушного компрессора 3, осушителя воздуха 5, озонатора 6, подключаемых к источнику переменного тока 2, а также фильтрующего элемента 4, газопроводов 7, электрических линий 1 и четырёх ёмкостей 8 с зерном. Озонаторная установка регулируемая, что позволяет изменять режим обработки. В процессе работы компрессор 3 через фильтр 4 подаёт воздух в осушитель 5, который обезвоживает его. Далее в озонаторе 6 воздушный поток насыщается озоном и поступает в ёмкости 8. Пройдя сквозь зерно, отработанная озонозадушенная смесь выбрасывается в атмосферу. Образование озона происходит из кислорода воздуха под действием электрического разряда тока высокой частоты. В процессе обработки поддерживали определённую концентрацию, которую определяли йодометрическим способом. Озонирование зерна проводили в течение 10 минут. Анализ концентраций озона, интенсифицирующих процесс сушки, показал, что для протекания необходимых биохимических процессов необходимо содержание газа в кубическом метре более 5 мг [8-10].

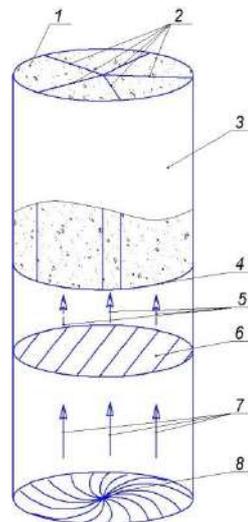


1 – электрические линии; 2 – источник переменного тока; 3 – компрессор; 4 – фильтрующий элемент;
5 – осушитель воздуха; 6 – озонатор; 7 – газопроводы; 8 – ёмкости с зерном

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки по озонированию влажного зерна перед сушкой

Сразу после озонирования влажного зерна его помещали в лабораторную установку для сушки, схема которой представлена на рисунке 2.

Лабораторная установка состоит из цилиндрического корпуса 3 (рисунок 2), разделённого перегородками 2 на пять равных секторов. В четыре отсека помещали озонированное зерно, а в пятый засыпали контрольный образец, который озонной обработке не подвергался. Внизу установки расположен вентилятор 8, который продувает воздушный поток 7 через нагревательный элемент 6. Далее нагретый воздух, проходя сквозь решето 4, пронизывает влажное зерно 1, просушивая его. Тем самым контрольный образец и проозонированное зерно находятся в равных условиях сушки. Нагревание проводили в течение часа. Каждые 15 минут измеряли влажность зерна во всех отсеках в пятикратной повторности прибором Wile-65.



1 – зерно; 2 – перегородки; 3 – корпус; 4 – решето; 5 – нагретый воздух; 6 – нагревательный элемент;
 7 – воздушный поток; 8 – вентилятор

Рисунок 2 – Схема лабораторной установки по сушке влажного зерна

Результаты и их обсуждение. Всего было проведено три эксперимента, которые отличались средней концентрацией озона при озонировании (5, 7,5 и 15,3 мг/м³). Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты лабораторных исследований по определению влияния предварительной обработки влажного зерна озоновооздушной смесью на последующий процесс сушки

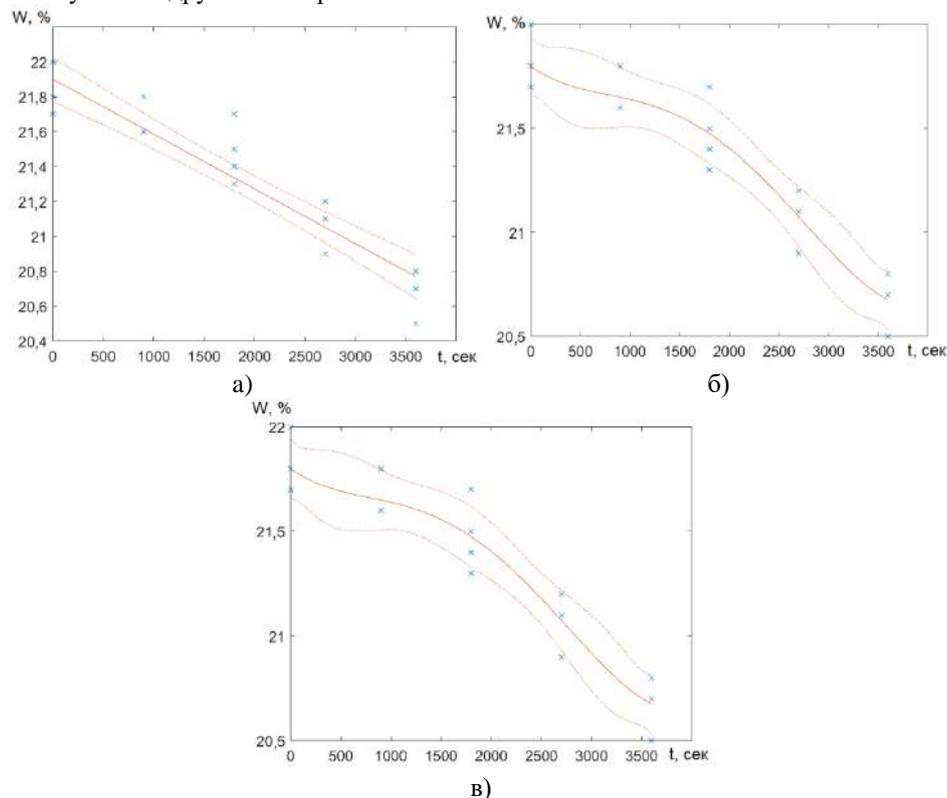
Концент- рация, мг/м ³	Время , с	Влажность зерна, %				Сушка без озонной обработки (контроль)	Температура воздуха при сушке, °С
		Ёмкость 1	Ёмкост ь 2	Ёмкост ь 3	Ёмкост ь 4		
5	0	21,7	21,7	21,8	22	21,6	29,2
5	900	21,6	21,6	21,6	21,8	21,5	31,3
5	1800	21,3	21,4	21,5	21,7	21,3	32,2
5	2700	20,9	21,1	21,1	21,2	21,1	31,4
5	3600	20,5	20,7	20,7	20,8	20,9	31
7,5	0	21,1	21,5	21,6	21,8	21,0	28
7,5	900	20,9	21,3	21,3	21,4	20,8	30,5
7,5	1800	20,4	20,9	21	20,9	20,6	32
7,5	2700	19,9	20,3	20,4	20,3	20,3	31,2
7,5	3600	19,4	19,4	19,6	19,7	19,9	30,9
15,3	0	20,8	20,9	21,0	21,2	20,5	30
15,3	900	20,6	20,8	20,8	21,1	20,4	31,2
15,3	1800	20,3	20,5	20,7	20,8	20,2	30,8
15,3	2700	19,8	20	20,2	20,3	19,9	31,8
15,3	3600	19,3	19,5	19,8	19,9	19,6	31,4

Анализ таблицы 1 показывает, что интенсивность снижения влажности зерна в экспериментах с предварительной озонной обработкой выше, чем в контрольных вариантах во всех опытах. Как видно из результатов лабораторных исследований процесс озонирования способствует незначительному увеличению содержания влаги. Это объясняется ослабеванию связей молекул воды с органическими частицами зерна и выходу их на поверхность. Однако удалить влагу с оболочки гораздо легче, чем из внутренних слоёв. Поэтому в дальнейшем снижение влажности

зерна идёт более интенсивно. Данная тенденция прослеживается во всех трёх экспериментах. По прошествии часа сушки влажность зерна у контрольных образцов была выше, чем у предварительно проозонированных. Это говорит о том, что в момент протекания периода постоянной сушки озон способствует интенсификации процесса. Однако без статистической обработки результатов исследований сравнивать полученные значения из разных опытов не корректно.

Для проведения качественного анализа полученных результатов исследований данные, приведённые в таблице 1, подвергались статистической обработке. Фактически каждый эксперимент был разбит на четыре части. В них условия проведения опыта были идентичны, то есть озонная обработка проходила с одинаковым содержанием озона в озоновоздушной смеси. По сути это были повторности, но они обрабатывались совместно, без усреднения. Это позволяет получить более наглядные результаты и учесть влияние каждой отдельной точки. Эксперименты с первого по третий отличаются друг от друга концентрацией озона в озоновоздушной смеси.

Для получения уравнения регрессии использовали Statistic and Machine Learning Toolbox из пакета прикладных программ Matlab. При этом проводилась серия подборок моделей зависимости влажности зерна при сушке от времени операции со статистической оценкой полученных результатов. Уравнения линейной регрессии в виде полиномов от 1 до 4 степени со всеми членами не давали удовлетворительного результата. Как видно из рис. 3а, для первого эксперимента линейная зависимость не вполне корректно оценивает изменчивость, и доверительный интервал модели оказывается вне ряда групп точек повторных опытов. В данном случае коэффициенты уравнения регрессии значимы и коэффициент детерминации R^2 составляет 0,88. Однако визуально понятно, что данные имеют некоторую кривизну, которая не отражается в модели. Подобный результат получен и в других экспериментах.



а – полином 1 степени; б – полином 4 степени; в – полином 2 степени;

× – экспериментальные точки; - - - граница 95% доверительного интервала; — — — аппроксимация
Рисунок 3 – Подбор моделей линейной регрессии зависимости влажности зерна (W) при сушке от времени операции (t) со статистической оценкой полученных результатов первого эксперимента

Модели более высоких порядков имеют другой недостаток. Для примера в таблице 1 показаны результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии в виде полинома 4 степени со всеми членами уравнения, которое имеет вид

$$W = k_0 + k_1 \cdot t + k_2 \cdot t^2 + k_3 \cdot t^3 + k_4 \cdot t^4, \quad (1)$$

где W – влажность зерна, %;

k_0 – свободный член уравнения;

k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты уравнения регрессии;

t – время сушки, с.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии в виде полинома 4 степени со всеми членами уравнения для первого эксперимента

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (tStat)	Уровень значимости (p-value)
k_0	21,8	0,067392	323,48	$3,0142 \cdot 10^{-30}$
k_1	-0,00034491	0,00041813	-0,82489	0,42236
k_2	$3,4851 \cdot 10^{-7}$	$5,8312 \cdot 10^{-7}$	0,59766	0,55898
k_3	$-1,9147 \cdot 10^{-10}$	$2,5896 \cdot 10^{-10}$	-0,73938	0,47109
k_4	$2,699 \cdot 10^{-14}$	$3,5808 \cdot 10^{-14}$	0,75376	0,46266

Количество наблюдений (Number of observations): 20

Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 15

Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,135

Коэффициент детерминации R^2 : 0,925

Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted) $R_{кор}^2$: 0,905

Критерий Фишера (F-statistic vs. constant model) $F_{расч}$: 46,1

Уровень значимости (p-value): $2,95 \cdot 10^{-8}$

Как видно из таблицы 1, расчетное значение критерия Стьюдента для всех членов уравнения, кроме постоянного, достаточно мало, что приводит к вероятности ошибки более 40%. Поэтому опираясь на расчетные значения уровня значимости, в таком уравнении нельзя доверять ни одному из коэффициентов уравнения регрессии, так как они все больше 0,05.

Аналогичная ситуация и с полиномом третьей степени. Данная модель также не адекватна и не может быть применима в данном случае.

Далее производили подбор уравнения регрессии в виде полинома 2 степени, которое имеет вид

$$W = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2, \quad (2)$$

где a_0 – свободный член уравнения;

a_1, a_2 – коэффициенты уравнения регрессии.

Статистические данные, полученные при подборе уравнения регрессии в виде полинома 2 степени для первого эксперимента, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии в виде полинома 2 степени со всеми членами уравнения для первого эксперимента

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (tStat)	Уровень значимости (p-value)
a_0	21,796	0,060721	358,96	$2,0087 \cdot 10^{-34}$
a_1	$-8,373 \cdot 10^{-5}$	$7,9921 \cdot 10^{-5}$	-1,0477	0,30946
a_2	$-6,3933 \cdot 10^{-8}$	$2,1288 \cdot 10^{-8}$	-3,0032	0,0080004

Количество наблюдений (Number of observations): 20

Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 17

Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,129

Коэффициент детерминации R^2 : 0,922

Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted) $R_{кор}^2$: 0,913

Критерий Фишера (F-statistic vs. constant model) $F_{расч}$: 100

Уровень значимости (p-value): $3,86 \cdot 10^{-10}$

Анализ таблицы 2 показывает, что по сравнению с моделью более высокого 4 порядка только один линейный член уравнения оказывается не значимым. При этом расчётное значение уровня значимости выше 0,3. Скорректированное значение коэффициента детерминации $R_{кор}^2 = 0,913$ выше, чем у линейной модели и моделей более высокого порядка.

Поскольку такая ситуация наблюдалась во всех экспериментах, было принято решение остановиться на моделях регрессии в виде

$$W = b_0 + b_1 \cdot t^2, \quad (3)$$

где b_0 – свободный член уравнения;

b_1 – коэффициент уравнения регрессии.

Статистические данные, полученные при подборе уравнения регрессии в данном случае для первого эксперимента, представлены таблице 3.

Таблица 3 – Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии в виде $W = b_0 + b_1 \cdot t^2$ для первого эксперимента

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (tStat)	Уровень значимости (p-value)
b_0	21,75	0,041268	527,04	$3,7352 \cdot 10^{-39}$
b_1	$-8,532 \cdot 10^{-8}$	$6,0549 \cdot 10^{-9}$	-14,091	$3,6515 \cdot 10^{-11}$

Количество наблюдений (Number of observations): 20
 Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 18
 Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,129
 Коэффициент детерминации R^2 : 0,917
 Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted) $R_{кор}^2$: 0,912
 Критерий Фишера (F-statistic vs. constant model) $F_{расч}$: 199
 Уровень значимости (p-value): $3,65 \cdot 10^{-11}$

Анализ таблицы 3 показывает, что действительно для первого эксперимента с озонированием озоновоздушной смесью с концентрацией озона 5 мг/м^3 получена модель со всеми значимыми коэффициентами уравнения регрессии. Коэффициент детерминации снизился не существенно и его скорректированное значение $R_{кор}^2 = 0,912$. Оценка модели по критерию Фишера показывает, что модель достаточно хорошо описывает вариативность данных. Его расчётное значение $F_{расч}$ равно 199, а уровень значимости (p-value) составляет $3,6515 \cdot 10^{-11}$. Это существенно ниже предельного значения 0,05.

Аналогичная ситуация с моделью во втором эксперименте, который проводился с обработкой зерна озоновоздушной смесью с концентрацией озона $7,5 \text{ мг/м}^3$. Статистические данные, полученные при подборе уравнения регрессии в данном случае, представлены таблице 4.

Таблица 4 – Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии в виде $W = b_0 + b_1 \cdot t^2$ для второго эксперимента

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (tStat)	Уровень значимости (p-value)
b_0	21,372	0,074562	286,64	$2,1525 \cdot 10^{-34}$
b_1	$-1,4758 \cdot 10^{-7}$	$1,094 \cdot 10^{-8}$	-13,49	$7,5025 \cdot 10^{-11}$

Количество наблюдений (Number of observations): 20
 Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 18
 Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,234
 Коэффициент детерминации R^2 : 0,91
 Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted) $R_{кор}^2$: 0,905
 Критерий Фишера (F-statistic vs. constant model) $F_{расч}$: 182
 Уровень значимости (p-value): $7,5 \cdot 10^{-11}$

Такие же результаты получены при статистической обработке третьего эксперимента, в котором обработку проводили озоновоздушной смесью с концентрацией озона $15,3 \text{ мг/м}^3$ (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии в виде $W = b_0 + b_1 \cdot t^2$ для третьего эксперимента

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (tStat)	Уровень значимости (p-value)
b_0	20,92	0,066887	312,77	$4,4774 \cdot 10^{-35}$
b_1	$-1,0394 \cdot 10^{-7}$	$9,8139 \cdot 10^{-9}$	-10,592	$3,6613 \cdot 10^{-9}$

Количество наблюдений (Number of observations): 20
 Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 18
 Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,21
 Коэффициент детерминации R^2 : 0,862
 Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted) $R_{кор}^2$: 0,854
 Критерий Фишера (F-statistic vs. constant model) $F_{расч}$: 112
 Уровень значимости (p-value): $3,66 \cdot 10^{-9}$

Анализ таблиц 3-5 показывает, что полученные модели можно считать адекватными, так как они имеют достаточно высокий коэффициент детерминации не ниже 0,85, все коэффициенты уравнений и критерий Фишера имеют расчетный уровень значимости выше 0,05. Кроме того, как видно из рис. 4, 95%-е доверительные интервалы для всех моделей находятся преимущественно в середине разброса точек экспериментальных данных, что говорит о невысокой дисперсии модели и её сопоставимости с дисперсией повторных экспериментов. Следовательно, с вероятностью 95% значения, полученные расчетным путём, будут в зоне дисперсии экспериментальных данных.

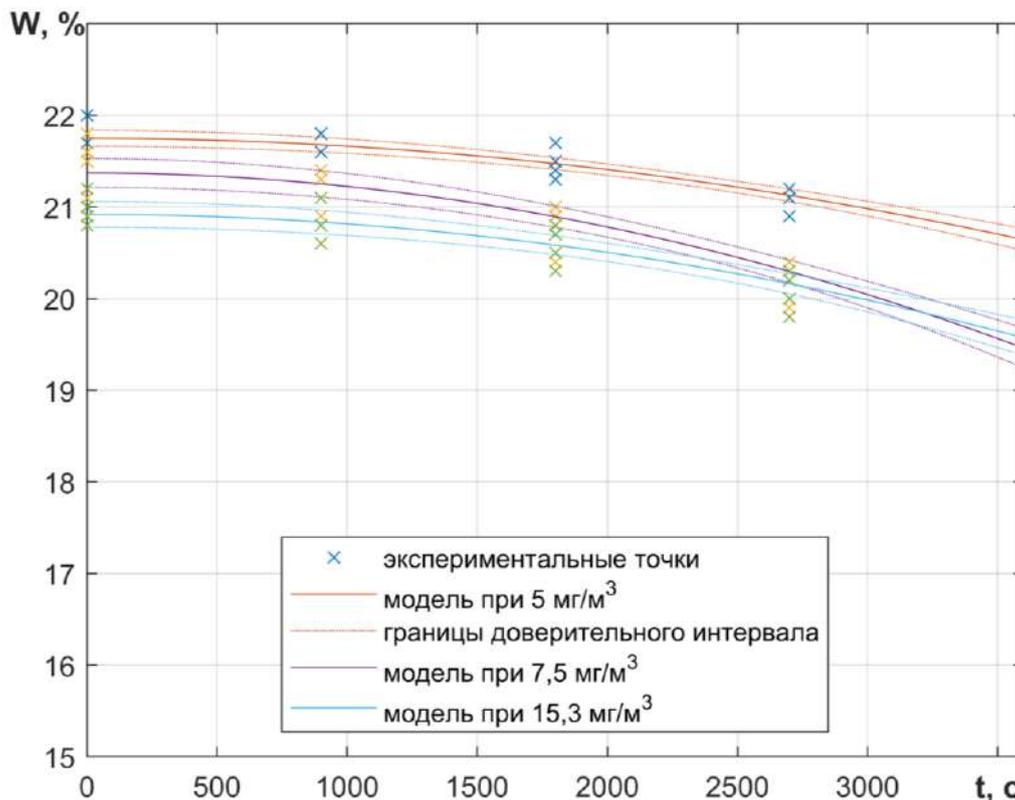


Рисунок 4 – Аппроксимация результатов исследований при изменении влажности зерна (W) при сушке в зависимости от времени операции (t) и режима предварительного озонирования

Как видно из рисунка 4 зависимости находятся достаточно близко друг от друга, но интенсивность снижения влажности зерна при сушке отличается. Это объясняется разными

условиями проведения эксперимента. Поэтому интерес представляет скорость сушки зерна, особенно относительные величины, по которым можно было бы сравнивать разные исследования.

Скорость изменения любого процесса может быть определена с помощью дифференцирования по времени, т.е.

$$V_{\text{суш}} = \frac{dW}{dt}, \quad (4)$$

где $V_{\text{суш}}$ – скорость сушки зерна, %/с.

В данном случае

$$V_{\text{суш}} = 2 \cdot b_1 \cdot t, \quad (5)$$

где b_1 – коэффициент уравнения регрессии, полученный выше.

Скорости изменения влажности зерна в зависимости от времени сушки при разных концентрациях озона при предварительной озонной обработке представлены на рис. 5.

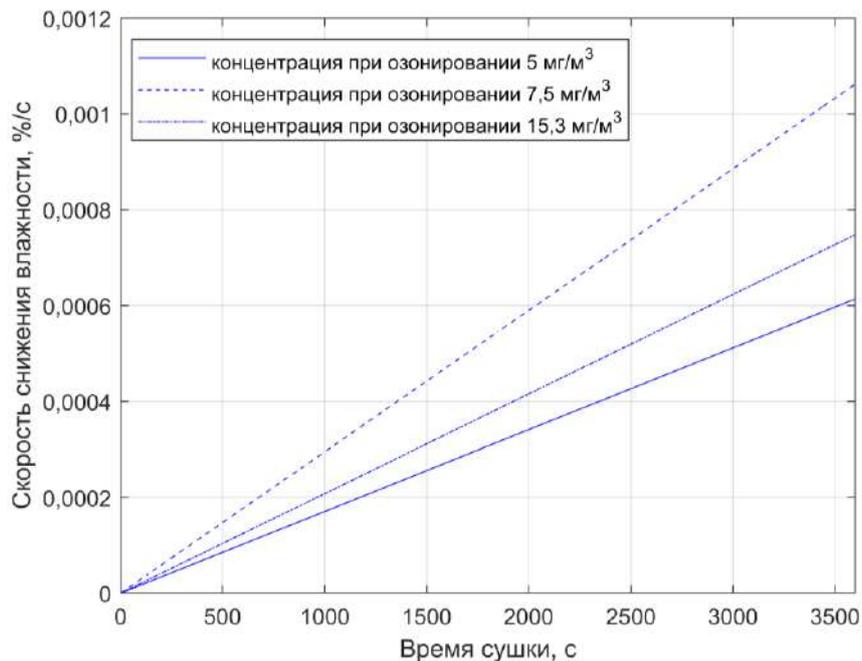


Рисунок 5 – Скорость снижения влажности зерна в зависимости от времени сушки при разных концентрациях озона при предварительной озонной обработке

Анализ рисунка 5 показывает, что скорость снижения влажности зерна носит линейный характер. Это вполне согласуется с теорией, поскольку в данный момент идёт период постоянной сушки. Однако в различных экспериментах темпы роста скорости снижения влажности зерна различаются. Это связано с отличающимися условиями экспериментов, некоторой системной погрешностью, которую на данном этапе выделить не представляется возможным.

Для оценки влияния предварительного озонирования влажного зерна на скорость снижения влажности зерна было принято решение воспользоваться относительной скоростью сушки

$$V_{\text{отн}} = \frac{V_{\text{суш.озон}}}{V_{\text{суш.контр.}}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{отн}}$ – относительная скорость сушки зерна;

$V_{\text{суш.озон}}$ – скорость сушки предварительно проозонированного зерна, %/с;

$V_{\text{суш.контр.}}$ – скорость сушки контрольного образца зерна, т.е. не подвергнутого озонированию, %/с.

Для расчёта относительной скорости сушки зерна аналогично вышеописанному алгоритму по данным таблицы 1, были получены модели изменения влажности зерна при сушке без обработки. Для каждого эксперимента контроль определяли отдельно. По этим моделям находили относительную скорость сушки зерна. Результат в графическом виде показан на рисунке 6.

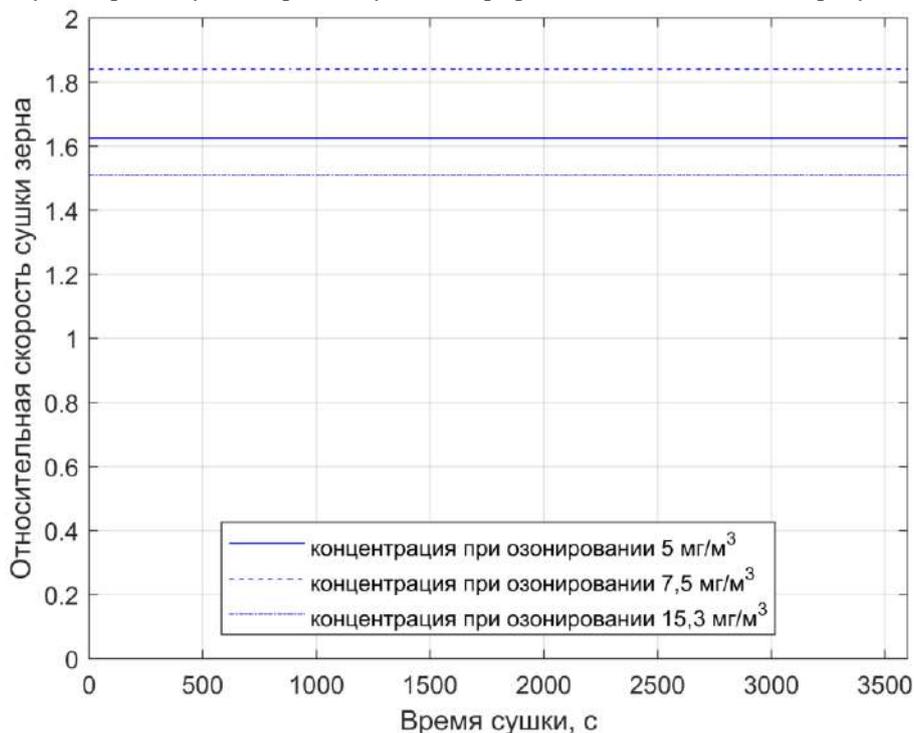


Рисунок 6 – Относительные скорости снижения влажности зерна при сушке после озонирования

Из рисунка 6 видно, что относительная скорость является постоянной величиной для каждого режима озонной обработки, поскольку идёт период постоянной сушки. Полученные графики позволяют утверждать, что обработка озоном позволила увеличить скорость сушки зерна в 1,51...1,84 раза. В целом наблюдается некоторая вариативность результата, но для получения закономерности прироста скорости в зависимости от дозы озонной обработки, вероятно, требуется большее количество экспериментов в различных условиях.

Заключение. Таким образом, целесообразность применения процесса предварительного озонирования не вызывает сомнений. Современные технические средства позволяют без сложного переоборудования модернизировать имеющиеся зерносушильные комплексы. Для этого необходимо буферные силосы дооснастить системой озонирования. Это позволит устранить недостатки использования озонородящей смеси в качестве сушильного агента. Применение предварительного озонирования влажного зерна в буферной ёмкости перед зерносушилкой с концентрацией озона 5...15,3 мг/м³ позволит повысить относительную скорость сушки в 1,51...1,84 раза. Это не только сократит расходы на доведение зерна до кондиционного состояния по влажности, но и положительно скажется на качестве просушиваемого материала.

Список источников

1. Баскаков И.В. Интенсификация процесса сушки зерна озонородящей смесью // Пищевая Метаинженерия. 2023. Т.1, № 3. С. 21-32. DOI: 10.37442/fme.2023.3.7 .
2. Зайченко Д.А., Литвинчук А.А., Куликов А.В., Жакова К.И., Миронов А.М. Изучение влияния электроактивированного воздуха на процесс сушки ячменного солода // Пищевая

промышленность: наука и технологии. 2023. Т.16, №1(59). С. 69-75. DOI: 10.47612/2073-4794-2023-16-1(59)-69-75.

3. 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.

4. Iqbal M.M., Muhammad G., Hussain M.A., Hanif H., Raza M.A., Shafiq Z. Recent trends in ozone sensing technology // Analytical Methods. 2023. №15(23). P. 2798-2822. DOI: 10.1039/d3ay00334e.

5. Sharma R., Bhandari M., Kaur K., Sohu R.S., Bhardwaj R., Dar B.N., Kaur P., Sharma S. Influence of Gaseous Ozonation on Bio-Techno-Functionality, In Vitro Nutrient Digestibility, and Molecular Properties of Red Sorghum Flour // Ozone: Science and Engineering. 2024. Vol. 46, № 2. P. 113-127. DOI: 10.1080/01919512.2023.2240845.

6. Баскаков И.В., Оробинский В.И., Гиевский А.М., Чернышов А.В., Тертычная Т.Н. Влияние процесса озонирования на эффективность сушки зерна кукурузы // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. Т.11, № 4(59). С. 127-133. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.4.127.

7. Патент на изобретение № 2709712 С1 РФ, МПК А01F 25/08. Способ сушки зернового материала / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.М. Гиевский, В.А. Гулевский, А.В. Чернышов, О.В. Чернова; патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. №2019118552; заявлено 14.06.2019; опубл. 19.12.2019. Бюл. № 35. 10 с.

8. Vasilyev A.A., Vasilyev A.N., Budnikov D. Tikhomirov D. Studying the Influence of Moisture Content in Grain on the Efficiency of the Microwave Field Transfer into a Grain Layer with the Use of a Computer Model // Applied Sciences (Switzerland). 2024. Vol. 14, № 5. P.1772. DOI: 10.3390/app14051772.

9. Ambarsari I., Cempaka I.G., Santoso S.B., Praptana R.H., Setiani C., Jatuningtyas R.K., Wulanjari M.E., Marzuki S.U., Ivanti L., Permadi S.N., Pramono J., Prasetyo T., Nur M. Field effectiveness of gaseous ozone storage in alleviating damage to aged soybean seeds // International Agrophysics. 2023. Vol. 37, № 4. P. 435-441. DOI: 10.31545/intagr/173207.

10. 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.

References

1. Baskakov I.V. Intensification of the Grain Drying Process with an Ozone-Air Mixture // Food Metaengineering. 2023. Vol.1, №3. Pp. 21-32. DOI: 10.37442/fme.2023.3.7.

2. Zaichenko D.A., Litvinchuk A.A., Kulikov A.V., Zhakova K.I., Mironov A.M. Study of the effect of electroactivated air on the drying process of barley malt // Food industry: science and technology. 2023. Vol. 16, №1(59). Pp. 69-75. DOI: 10.47612/2073-4794-2023-16-1(59)-69-75.

3. 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.

4. Iqbal M.M., Muhammad G., Hussain M.A., Hanif H., Raza M.A., Shafiq Z. Recent trends in ozone sensing technology // Analytical Methods. 2023. №15(23). P. 2798-2822. DOI: 10.1039/d3ay00334e.

5. Sharma R., Bhandari M., Kaur K., Sohu R.S., Bhardwaj R., Dar B.N., Kaur P., Sharma S. Influence of Gaseous Ozonation on Bio-Techno-Functionality, In Vitro Nutrient Digestibility, and Molecular Properties of Red Sorghum Flour // Ozone: Science and Engineering. 2024. Vol. 46, № 2. P. 113-127. DOI: 10.1080/01919512.2023.2240845.

6. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.V., Chernyshov A.V., Tertychnaya T.N. The impact of ozonation on the efficiency of drying of corn grain // Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2018. Vol. 11, № 4(59). Pp. 127-133. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.4.127.

7. Patent for invention № 2709712 C1 Russian Federation, IPC A01F 25/08. The method of drying grain material / Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.V., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V.,

Chernova O.V.; the patent holder: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great. №2019118552; application 14.06.2019; publ. 19.12.2019. Bull. № 35. 10 p.

8. Vasilyev A.A., Vasilyev A.N., Budnikov D. Tikhomirov D. Studying the Influence of Moisture Content in Grain on the Efficiency of the Microwave Field Transfer into a Grain Layer with the Use of a Computer Model // Applied Sciences (Switzerland). 2024. Vol. 14, № 5. P.1772. DOI: 10.3390/app14051772.

9. Ambarsari I., Cempaka I.G., Santoso S.B., Praptana R.H., Setiani C., Jatuningtyas R.K., Wulanjari M.E., Marzuki S.U., Ivanti L., Permadi S.N., Pramono J., Prasetyo T., Nur M. Field effectiveness of gaseous ozone storage in alleviating damage to aged soybean seeds // International Agrophysics. 2023. Vol. 37, № 4. P. 435-441. DOI: 10.31545/intagr/173207.

10. 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.

Информация об авторах

И.В. Баскаков – доктор сельскохозяйственных наук, доцент; В.И. Орбинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; А.В. Химченко – кандидат технических наук, доцент; В.Ю. Кирмасов – ассистент; 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; V. Kirmasov – Assistant; 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): 03.06.2024 Принята к публикации (Accepted): 11.08.2024