

Исследование сушки зернового материала с наложением электрогидродинамического потока на пилотной установке непрерывного действия

Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар, Российская Федерация

Х.А. Мунассар, И.А. Шорсткий, А.Г. Шерстюков

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Е.Х.А. Мунассар

E-mail: emadmounasar@gmail.com

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мунассар, Е.Х., Шорсткий, И.А., & Шерстюков, А.Г. (2025). Исследование сушки зернового материала с наложением электрогидродинамического потока на пилотной установке непрерывного действия. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 130-140. <https://doi.org/10.36107/spfr.2025.1.620>

ПОСТУПИЛА: 22.10.2024

ДОРАБОТАНА: 01.03.2025

ПРИНЯТА: 15.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00205, <https://rscf.ru/project/25-29-00205/>



АННОТАЦИЯ

Введение: Современные технологии сушки зернового сырья ориентированы на повышение энергоэффективности процессов при одновременном обеспечении сохранности качественных характеристик продукции. Энергетическая эффективность сушки напрямую влияет на уровень технологической и экономической конкурентоспособности предприятий зерноперерабатывающей отрасли. В условиях роста объемов перерабатываемого сырья и, как следствие, увеличения энергетических затрат, актуализируется необходимость внедрения альтернативных методов сушки. В то же время остаётся недостаточно изученной область применения электрогидродинамического (ЭГД) потока в процессах обезвоживания зерновых материалов, что указывает на существующий научно-технологический пробел и обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований в данном направлении.

Цель: Изучение процесса сушки зернового материала в ЭГД потоке на пилотной установке непрерывного действия с определением эффективности сушки, потребления энергии и возможности масштабирования установки.

Материалы и методы: В качестве объекта сушки использовали фуражное зерно пшеницы. В качестве технологии сушки с ЭГД-потоком использовали пилотную сушильную установку производительностью 50 кг/час. Установка работает по циклическому принципу, воздействуя на фуражное зерно пшеницы попеременно коронным и искровым разрядом, многократно пропуская зерновой материал через электродные блоки до достижения заданного уровня влажности. Напряженность электрического поля в зоне обработки достигала 8 кВ/см. Анализ эффективности сушки проводили путем оценки кинетики сушки, общего энергопотребления и эксергетического показателя сушки. Все эксперименты были проведены в трехкратной повторности, а результаты статистически обработаны методами ANOVA анализа.

Результаты: Показано, что наложение электрогидродинамического потока на зерновой материал вызывает комбинацию эффектов «травления» поверхности зерна с возникновением мелкоячеистой структуры и способствует объемному нагреву за счет Джоулева тепла. При сушке зерна с использованием электрогидродинамического потока снижение влажности зерна за один проход в установке составило 0,28%. Удельные затраты предлагаемой установки составляют 1,85 кВт/кг влаги, что на 30% ниже по сравнению с традиционной сушкой с использованием теплового агента при аналогичных температурных условиях.

Выводы: Установка для сушки зернового материала с наложением электрогидродинамического потока может быть использована в технических линиях малой производительности с целью подсушки или полноценной сушки зернового материала. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых сушильных установок и модернизации существующих технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

зерновой материал; электрогидродинамический поток; коронный разряда; искровой разряд; технологическое оборудование

Electrohydrodynamic Grains Drying on Pilot Equipment with Continuous Flow

Kuban State Technological University,
Krasnodar, Russian Federation

Emad Munassar, Ivan Shorstkii, Andrey Sherstyukov

CORRESPONDENCE:

Emad Munassar

E-mail: emadmounasar@gmail.com

FOR CITATIONS:

Munassar, E.H., Shorstkii, I.A., & Sherstyukov, A.G. (2025). Electrohydrodynamic grains drying on pilot equipment with continuous flow. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 130-140. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.620>

RECEIVED: 22.10.2024

REVISED: 01.03..2025

ACCEPTED: 15.03..2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The research was funded by the Russian Science Foundation within the framework of the scientific project no. 25-29-00205



ABSTRACT

Introduction: Modern grain drying technologies aim to improve energy efficiency while preserving the quality characteristics of the final product. The energy performance of drying processes directly influences the technological and economic competitiveness of grain processing enterprises. In the context of increasing volumes of processed raw materials and the associated rise in energy consumption, the need for alternative drying methods is becoming increasingly relevant. At the same time, the application of electrohydrodynamic (EHD) flow in grain drying processes remains insufficiently explored, indicating a scientific and technological gap that necessitates further research in this area.

Purpose: To study the drying process of grain material in the EHD flow on pilot equipment with continuous flow and to determine drying efficiency, energy consumption and the possibility of scaling the equipment.

Materials and Methods: Feed grain of wheat was used as the drying object. A pilot drying unit with a capacity of 50 kg/hour was used as an EHD-flow drying technology. The equipment operates on a cyclic principle, acting on the feed grain of wheat alternately with a corona and spark discharge, repeatedly passing the grain material through the electrode blocks until a preset moisture level is reached. The electric field strength in the treatment area reached 8 kV/cm. The drying efficiency was analyzed by evaluating the drying kinetics, total energy consumption, and exergetic drying index. All experiments were repeated three times, and the results were statistically processed using ANOVA analysis methods.

Results: It is shown that the superposition of electrohydrodynamic flow on grain material causes a combination of the effects of "etching" the grain surface with the appearance of a fine-mesh structure and promotes volumetric heating due to Joule heat. When drying grain using electrohydrodynamic flow, the decrease in grain moisture in one pass in the equipment was 0.28%. The unit cost of the proposed equipment is 1.85 kW/kg of moisture, which is 30% lower than traditional drying using a thermal agent under similar temperature conditions.

Conclusions: The equipment for drying grain material with the application of electrohydrodynamic flow can be used in low-productivity technical lines for the purpose of drying or full-fledged drying of grain material. The results obtained can be used in the development of new drying plants and the modernization of existing technologies in agriculture and food industry.

KEYWORDS

grain material; electrohydrodynamic flow; corona discharge; spark discharge; technological equipment

ВВЕДЕНИЕ

Современные агропромышленные и пищевые технологии функционируют в условиях растущих требований к энергоэффективности, экологической безопасности и сохранению качественных характеристик перерабатываемой сельскохозяйственной продукции. В рамках традиционного термомеханического подхода возможности повышения эффективности процессов сушки считаются практически исчерпанными, что обуславливает необходимость разработки альтернативных технологических решений, основанных на применении физических эффектов.

В данном контексте особое внимание привлекают электрофизические методы обработки, обладающие рядом технологических и энергетических преимуществ (Baskakov, 2023; Li, 2014; Scholtz, 2019). Среди них можно выделить такие технологии, как воздействие импульсным электрическим полем высокого напряжения (Мунассар, 2024), озонирование (Шорсткий, 2023), микроволновая (СВЧ) сушка (Ali, 2025), а также технология сушки с применением электрогидродинамического (ЭГД) потока (Paul, 2021).

Наблюдается возрастающий интерес к применению ЭГД-потока, что обусловлено его конкурентными преимуществами: возможность создания направленных газовых потоков без использования турбин и вентиляторов, низкое энергопотребление, а также способность воздействовать непосредственно на влагосодержащие компоненты материала. Потенциал ЭГД-сушки как альтернативы конвективным методам обработки термолабильных продуктов подтверждается в ряде экспериментально-промышленных исследований (Baldanov, 2020; Los, 2019).

В отличие от других электрофизических технологий (например, импульсного электрического поля или омического нагрева), ЭГД-сушка обеспечивает равномерное и бесконтактное удаление влаги с дополнительным эффектом обеззараживания поверхности зерна (Шорсткий, 2022). Конструктивно установка ЭГД-сушки включает высоковольтный источник питания и электродную систему, геометрия которой влияет на эффективность переноса влаги (Charpe, 2020; Malekjan, 2018). Механизм действия ЭГД-потока может включать как физико-химическое воздействие за счёт заряженных частиц,

так и воздействие ультрафиолетового излучения, сопровождающего коронный разряд (Dubinov, 2000).

Необходимость оптимизации параметров ЭГД-воздействия обусловлена тем, что слабый ток не обеспечивает достаточной ионизации потока, в то время как превышение порога может вызывать термическое разрушение биологических объектов (Baskakov, 2023; Munassar, 2024a; Baldanov, 2020; Anukiruthika, 2021). Исследования в данной области преимущественно сосредоточены на оценке кинетики сушки, энергоэффективности и качества получаемого продукта (de Groot, 2018; Randeniya, 2015), а также на выборе оптимальной геометрии электродов (Defraeye, 2018; Singh, 2012).

Вместе с тем, результаты существующих исследований демонстрируют низкую масштабируемость систем с плоскостными или игольчатыми электродами до промышленного уровня (Ciprian, 2022; Singh, 2012). Понятие масштабируемости в данной работе трактуется как способность системы к изменению производительности посредством модификации конструкции при минимальных ресурсных и временных затратах (Du, 2022; Stolárik, 2015).

При увеличении объема обрабатываемого сырья эффективность сплошных пластинчатых электродов снижается из-за неравномерного распределения ЭГД-потока (Charles, 2021; Šimek, 2021). В таких условиях ионизированный поток преимущественно осаждается на электродной поверхности, не обеспечивая эффективного влаговывода из объёма материала. Согласно результатам численного моделирования, использование сетчатого электрода, выполненного из комбинации диэлектрических и проводящих материалов, позволяет значительно повысить равномерность и интенсивность сушки (Iranshahi, 2022; Defraeye, 2018). Однако на сегодняшний день подтверждение эффективности таких конструкций в отношении зернового сырья в режиме попеременного коронного и искрового разрядов отсутствует.

Цель настоящего исследования заключается в экспериментальном изучении процесса сушки зернового материала в ЭГД-потоке с чередующимся действием коронного и искрового разрядов на пилотной установке. Особое внимание уделено оценке кинетических характеристик процесса, энергоэффективности и масштабируемости системы.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и модернизации сушильных установок для нужд агропромышленного и пищевого комплексов.

щью анализатора влажности ЭВЛАС-2М (Россия). Для проведения одного цикла обработки использовали пшеницу массой 1,5 кг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы и подготовка образцов

В качестве объекта исследований использовалось фуражное зерно пшеницы. Влажность зернового материала перед началом эксперимента довели до $21,36 \pm 0,25\%$ в герметичной емкости путем добавления дистиллированной воды, просчитанного объёма. Изначальный показатель влажности соответствует собранному зерну пшеницы с полей Краснодарского края, Россия. Оценка показателя влажности для каждого этапа проводили с помо-

Пилотная сушильная установка с добавлением ЭГД потока

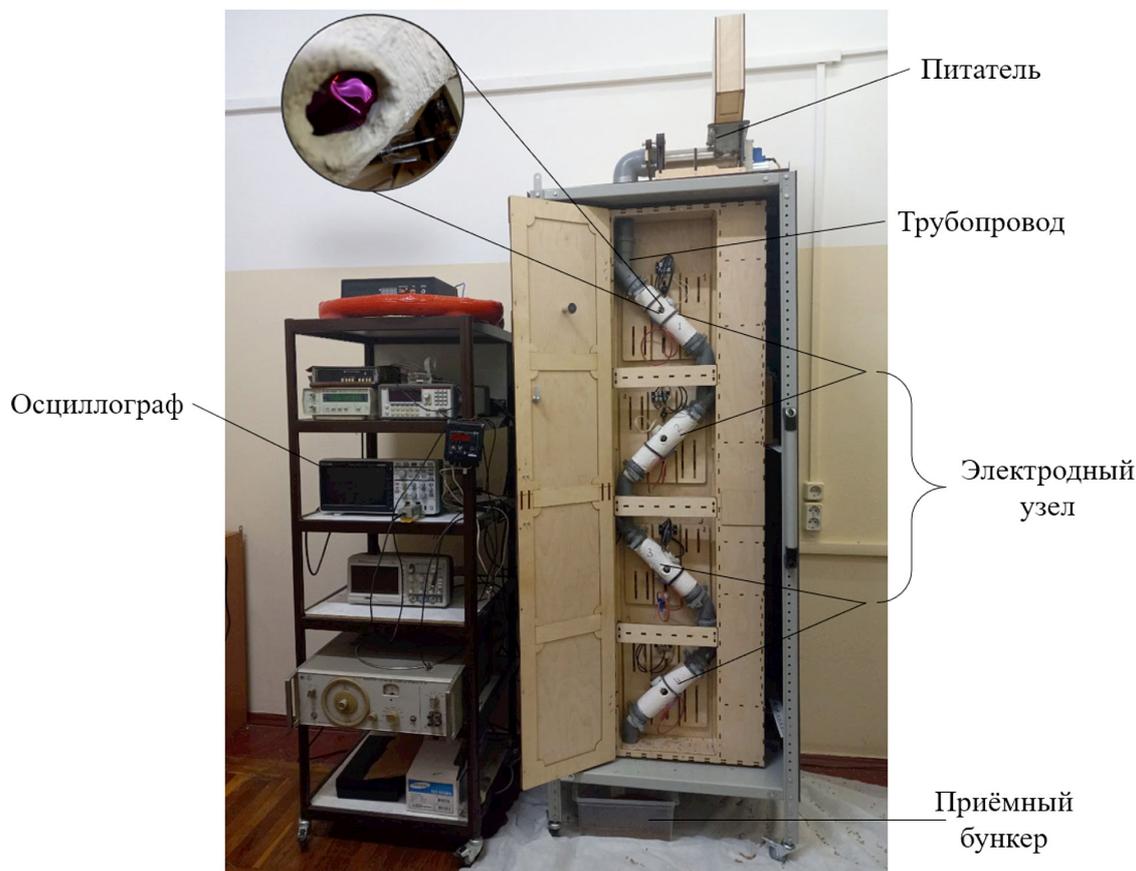
Пилотная сушильная установка показана на Рисунке 1. Её рабочим органом выступает трубопровод радиусом 25 миллиметров, который выполнен из диэлектрического материала. В верхней части корпуса установки закреплён шнековый дозатор, подсоединенный к началу трубопровода. Сам рабочий орган состоит из четырёх секций, каждая из которых снабжена узлами обработки низкотемпературной плазмы. Трубопровод выполнен под некоторым углом к горизонту, который позволяет беспрепятственно перемещаться обраба-

Рисунок 1

Пилотная зерносушильная установка с применением ЭГД потока и электродный узел при разряде

Figure 1

Pilot Grain Drying Plant with Application of EHD Flow and Electrode Assembly During Discharge



тываемому материалу самотёком. В нижней части трубопровод подсоединён к узлу вывода обработанного материала, выполненного в виде бункера. Узел обработки низкотемпературной плазмой представляет из себя два электрода, подключенных к генератору высокого напряжения и заземлению. Источником питания служит управляемый блок SH-0105 от компании Науэл (Россия) с максимальной мощностью 100 Вт. Анод данной пилотной установки имеет выходное напряжение до 20 кВ, благодаря генератору высокого напряжения. Катод выполнен в виде петли из металлической нити накала, для образования термоэлектронной эмиссии. Она повышает энергию электронов, которая становится больше полной работы выхода.

Установка функционирует по принципу циклического пропускания материала зернового происхождения через электродные узлы до реализации необходимой влажности. Поток зернового материала в трубопровод поступает равномерно сверху вниз, благодаря шнековому дозатору. После каждого прогона пшеницы через пилотную установку измеряется температура зернового материала прибором ИК-пирометр RGK pl-8, его масса на электронных весах, а также влажность. В верхней части установки установлен анемометр для снятия показаний скорости электроактивированного сушильного агента, а для повышения его скорости прохождения пилотная установка снабжена вытяжной системой. В целях безопасности корпус установки выполнен из диэлектрического материала.

Электродинамические характеристики тока и напряжения подаваемого импульса контролировались с помощью осциллографа Tektronix TDS 220 через делитель $\times 1000$ (Tektronix).

Условия проведения испытаний представлены в Таблице 1.

Постановка эксперимента была осуществлена согласно запатентованной технологии (Sharma, 2023) и протоколу испытаний (Таблица 1). В качестве вариации рассмотрено: сушка с наложением ЭГД потока, и сушка тепловым агентом (воздух при температуре 65 °С и скоростью потока 1,7 м/с). Количество циклов пропускания — 50.

Перед экспериментом образцы семян пшеницы доводили до комнатной температуры. Эксперименты

Таблица 1

Показатели исходных данных эксперимента

Table 1

Experimental Setup Parameters

Показатели	Испытания	
Вид зерна	фуражное зерно пшеницы	
Режим сушки	ЭГД поток	Сушильный агент
Температура, °С:		
Наружного воздуха	21,0 ± 0,5	21,0 ± 0,5
Внутри камеры	70	65
Относительная влажность воздуха в помещении, %	60 ± 3%	
Влажность материала до обработки, %	21,56	

проводились при атмосферных условиях (температура воздуха 21 ± 0,5 °С с относительной влажностью 60 ± 3%).

Анализ энергетических затрат

Энергетические затраты рассчитаны отдельно для общих энергетических затрат и затрат на реализацию электрогидродинамического потока. К общим энергетическим затратам относятся в том числе потери в высоковольтном источнике питания и вспомогательных инструментах. Величина потерь зависит от масштабов оборудования и в значительной степени варьируется при масштабировании. Поэтому в данной работе используется величина удельных энергетических затрат отнесенную к единице испаренной влаги:

$$W = P \cdot t_{\text{обр}} / m_{\text{исп}}, \quad (1)$$

где P — энергия ЭГД потока, которая определяется как $P = UI$, где I — ток разряда, А; U — напряжение разряда, В. Величина t_{crit} определена как время достижения влагосодержания зерна 7%.

Литературное значение для стандартной сушильной установки составляет $W_{\text{уд}} = 0,64$ кВт·ч/кг H_2O , представляющий собой скрытую теплоту испарения воды при 100 °С (Chaple, 2020).

Эксергетический показатель сушки (η_E) определяется как отношение энергии, используемой для ис-

парения влаги (E_{ev}), к общей энергии, подаваемой в сушилку (E_{in}) (Chaple,2020):

$$\eta_E = \frac{E_{ev}}{E_{in}} = \frac{(m_{eva})(C_p\Delta T + L_{eva})}{P(t_2 - t_1)}, \quad (2)$$

где m_{eva} — масса испарившейся влаги, кг; C_p — удельная теплоёмкость воды при постоянном давлении (≈ 4200 Дж/кг·К при 20 °С), L_{eva} — скрытая теплота испарения (≈ 2450 кДж/кг при 20 °С).

Статистический анализ

Все эксперименты проводились с трехкратным повторением. Для экспертизы действительности различий между исследуемыми параметрами применялся дисперсионный анализ по методике ANOVA при уровне значимости $p < 0,05$. В программной среде Excel проводили статистический анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Энергетические показатели установки

Путем циклического пропускания через электродные узлы зерно доводилось до достижения кондиционной влажности. В соответствии с полученными осциллограммами тока и напряжения (Рисунок 2) определен приведенный расход тепла и эксергетический показатель сушки. В целом, значения $W_{уд}$ зависят от характеристик плазменного разряда.

Результаты экспериментальных исследований сушки с наложением ЭГД потока в соответствии с протоколом испытаний представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Показатели испытаний для поставленного эксперимента

Table 2

Test Parameters for the Experiment

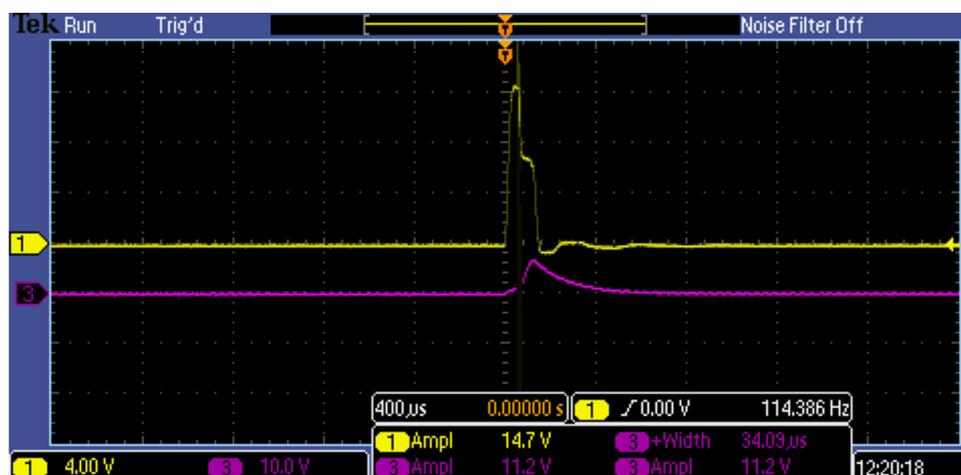
Показатели	испытания	
	Электрогидродинамический поток (ЭГД)	Сушильный агент
Производительность, кг/ч	50	50
Влажность материала, % до обработки среднее /стандартное отклонение, \pm %; после обработки среднее /стандартное отклонение, \pm %.	21,56 \pm 0,3 7,39 \pm 0,4	21,56 \pm 0,3 11,72 \pm 0,4
Температура материала до/после обработки, °С	21/35	21/30
Снижение влажности зерна за один цикл, %	0,28	0,2
Количество испаренной влаги, кг/ч	1,42	1,19
Приведенный расход тепла на 1 кг испаренной влаги, кДж/кг ($W_{уд}$)	1,85	2,57
Эксергетический показатель сушки, η_E	7,53	12,07

Рисунок 2

Осциллограмма тока (линия 3) и напряжения (линия 1) разряда ЭГД потока

Figure 2

Oscillogram of the Current (curve 3) and Voltage (curve 1) Waveforms of EHD Flow Discharge



ЭГД поток формируется благодаря электроактивированному сушильному агенту, который включает в себя смесь озона и воздуха, а также ионы. Данный электроактивированный сушильный агент пропускается через слой зерна, осуществляя процесс сушки. Также на семена одновременно действует электрическое поле. В данном эксперименте был применён режим дугового разряда с объемной плотностью около 10^{-2} Кл/м³.

Эффективность сушки с применением электрогидродинамического потока

На Рисунке 3 представлена кривая сушки и температуры нагрева зерна, согласно поставленного эксперимента. Стоит отметить, что наличие ЭГД потока способствует более длительному периоду постоянной скорости сушки, и как следствие более быстрому процессу сушки до достижения требуемой влажности. Наличие ЭГД потока при равных условиях эксперимента способствует более высокому значению температуры зерна, что говорит о наличии эффекта Джоулева тепла при прохождении электродных узлов.

В ходе экспериментов было выяснено, что при добавлении ЭГД потока к сушке зернового матери-

ала его влажность получилось снизить на 0,28% за один проход (до 6%). Начальное содержание влаги составляло 21,56%, после одного цикла сушки влажность снизилась до 21,28%. Для получения требуемого значения влажности зерна в 7% было произведено 50 циклов сушки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведённых экспериментов демонстрируют высокую эффективность применения электрогидродинамического (ЭГД) потока в процессах сушки зернового материала. Установлено, что при однократном прохождении материала через зону обработки снижение влажности составило в среднем 0,28 %, что подтверждает наличие активного массопереноса под воздействием попеременного коронного и искрового разрядов. Данное воздействие обуславливает формирование мелкочаеистой структуры на поверхности зерна, что, по-видимому, связано с эффектом плазменного микротравления, а также способствует внутреннему прогреву материала за счёт локализованного джоулева тепла.

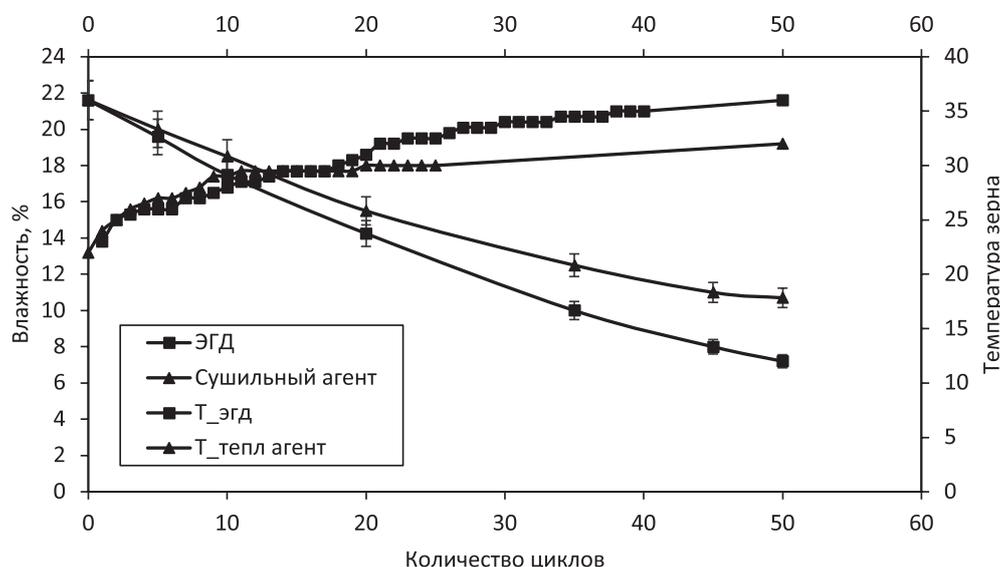
Суммарные удельные затраты энергии при использовании экспериментальной установки составили

Рисунок 3

Кривая сушки и температуры нагрева зернового материала в пилотной установке

Figure 3

The Curve of Drying and Heating Temperature of Grain Material in a Pilot Equipment



1,85 кВт·ч/кг испарённой влаги, что на 30 % ниже аналогичных показателей, характерных для традиционных методов сушки с применением теплового агента в сходных температурных условиях (Charle, 2020; Jiang, 2022; Paziuk, 2021). Это указывает на высокий уровень энергетической эффективности исследуемой технологии, что особенно важно в контексте задач импортозамещения и повышения технологической автономности агропромышленного сектора.

Сравнение с опубликованными данными показывает, что эффективность сушки с применением ЭГД-потока, реализованного в виде стабильного и равномерного воздействия, сопоставима, а в отдельных случаях превосходит результаты, полученные в ряде других исследований (Anukiruthika, 2021). Подобное преимущество может быть обусловлено конструктивными особенностями установки, включающей циклическое попеременное воздействие коронного и искрового разрядов, позволяющее объединить достоинства ионного массопереноса и объемного теплового воздействия.

Отдельного внимания заслуживает показатель приведённого теплового расхода, значение которого в рамках данного исследования оказалось ниже, чем в случае промышленных зерносушильных агрегатов (Павлов, 2018). Такое расхождение частично может объясняться эффектом масштабирования: в условиях лабораторно-промышленной установки обеспечивается более эффективное распределение ЭГД-потока и более точный контроль технологических параметров. При этом рассчитанный эксергетический показатель оказался сопоставим с аналогичными данными в работах Charle (2020) и Paziuk (2021), что подтверждает термодинамическую состоятельность предложенной технологии.

Ограничения исследования

Несмотря на положительные результаты, настоящее исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, испытания проводились в условиях пилотной установки ограниченной производительности, что может не в полной мере отражать характеристики технологии при её промышленном масштабировании. Во-вторых, в работе рассматривался только один тип зернового материала — фуражная пшеница, что ограничивает универсальность

полученных выводов. Кроме того, в исследовании не проводилась комплексная оценка микробиологических показателей и влияния обработки на последующее хранение продукта. Также не изучено влияние различных режимов чередования коронного и искрового разрядов на равномерность сушки и сохранность нутриентов. Эти аспекты требуют дальнейшего экспериментального изучения и включения в будущие циклы исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании представлены результаты экспериментального анализа процесса сушки зернового материала с использованием электрогидродинамического (ЭГД) потока, реализованного посредством попеременного воздействия коронного и искрового разрядов. Работа выполнена на пилотной установке непрерывного действия с целью определения кинетических характеристик сушки и оценки энергоэффективности технологии.

Проведенный сравнительный анализ с традиционным методом сушки, основанным на применении теплового агента при сопоставимых температурных и производственных условиях, продемонстрировал снижение удельного расхода тепла на единицу удалённой влаги на 30 % при использовании ЭГД-обработки. Достижение данного эффекта обусловлено синергетическим действием джоулева тепла и направленного ионного потока (ионного ветра), что обеспечило среднее снижение влажности зерна на 0,28 % за один проход через установку. Эти показатели сопоставимы с результатами, демонстрируемыми промышленными зерносушильными установками, функционирующими в аналогичном режиме.

Полученные данные подтверждают технологическую состоятельность и высокий потенциал использования ЭГД-сушки для энергосберегающей и щадящей обработки зерновых материалов. Сформированные на данной основе выводы актуализируют необходимость дальнейших исследований, направленных на разработку каскадных модульных комплексов установок ЭГД-сушки, обеспечивающих масштабируемость и адаптацию технологии к промышленным условиям.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Емад Хуссеин Али Мунассар: проведение исследования; валидация результатов; написание черновика рукописи.

Иван Александрович Шорсткий: концептуализация; получение финансирования; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Андрей Геннадьевич Шерстюков: формальный анализ; визуализация.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Emad H.A. Munassar: investigation; validation; writing — original draft preparation.

Ivan A. Shorstkii: conceptualization; funding acquisition; writing — review & editing.

Andrey G. Sherstyukov: formal analysis; visualization.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Баскаков, И. В., Оробинский, В. И., Гиевский, А. М., Чернышов, А. В., & Чернова, О. В. (2023). Влияние процесса озонирования на качественные показатели зерна озимой пшеницы. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 177–189. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.396>
- Baskakov, I.V., Orobinsky, V.I., Gievsky, A.M., Chernyshov, A.V., & Chernova, O.V. (2023). The Influence of the ozonation process on the quality indicators of winter wheat grain. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 177–189. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.396>
- Мунассар, Е. Х. А., & Шорсткий, И. А. (2024а). Сушка зернового материала с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда. *Техника и технология пищевых производств*, 54(1), 116–123. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493>
- Mounasar, E.H.A., & Shorstkii, I.A. (2024a). Drying grain pretreated by low-voltage spark-discharge plasma channel. *Food Processing: Techniques and Technology*, 54(1), 116–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493>
- Мунассар, Е. Х. А., & Шорсткий, И. А. (2024б). Зерносушильная установка на базе электрогидродинамического потока. В *Передовые исследования Кубани: Сборник материалов Ежегодной отчетной конференции грантодержателей Кубанского научного фонда* (с. 84–86). Краснодар: Кубанский научный фонд.
- Mounasar, E. Kh. A., & Shorstkii, I. A. (2024b). Grain drying unit based on electrohydrodynamic flow. In *Advanced research of Kuban: Proceedings of the Annual Reporting Conference of Grant Recipients of the Kuban Science Foundation* (pp. 84–86). Krasnodar: Kuban Science Foundation. (In Russ.).
- Павлов, С. А. (2018) Исследования сушки зерна в автоматизированном зерносушильном агрегате. *Сельскохозяйственные машины и технологии*, 12(4), 29–34. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-29-34>
- Pavlov, S.A. (2018). Study of grain drying in the automated grain drying unit. *Agricultural Machinery and Technologies*, 12(4), 29–34. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-29-34>
- Шорсткий И. А., & Мунассар Е. Х. (2023). Влияние низкотемпературной атмосферной плазмы слаботочных высоковольтных разрядов на структуру поверхности и водопоглощающую способность зернового материала. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 85(2), 23–31. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-2-23-31>
- Shorstkii, I.A., & Mounassar, E.H. (2023). Effect of low current cold atmospheric plasma on grains surface structure and water absorption capacity. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 85(2), 23–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-2-23-31>
- Ali M. E. H., Sherstyukov A., & Shorstkii I. (2025). Application of cold filamentary microplasma pretreatment for wheat seeds drying. *Drying Technology*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/07373937.2025.2472386>

- Anukiruthika, T., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Electrohydrodynamic drying of foods: Principle, applications, and prospects. *Journal of Food Engineering*, 295, 110449. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110449>
- Ayeni, K. I., Atanda, O. O., Krska, R., & Ezekiel, C. N. (2021). Present status and future perspectives of grain drying and storage practices as a means to reduce mycotoxin exposure in Nigeria. *Food Control*, 126, 108074. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108074>
- Baldanov, B. B., Ranzhurov, T. V., Sordonova, M. N., & Budazhapov, L. V. (2020). Changes in the properties and surface structure of grain seeds under the influence of a glow discharge at atmospheric pressure. *Plasma Physics Reports*, 46, 110–114. <https://doi.org/10.1134/S1063780X2001002X>
- Chaple, S., Sarangapani, C., Jones, J., Carey, E., Causeret, L., Genson, A., Duffy, B., & Bourke, P. (2020). Effect of atmospheric cold plasma on the functional properties of whole wheat (*Triticum aestivum* L.) grain and wheat flour. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102529. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102529>
- Charles, A. P. R., Jin, T. Z., Mu, R., & Wu, Y. (2021). Electrohydrodynamic processing of natural polymers for active food packaging: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 6027–6056. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12827>
- Ciprian Foronda, K. D., Gafaro Garcés, D. C., Restrepo Rendón, L., Mendoza Alvites, Y. Y., Ricardo Sagra, J. P., Orozco Mendoza, G. L., & Zarthia Sossa, J. W. (2022). Electrohydrodynamic drying in agribusiness: Literature review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 761297. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.761297>
- de Groot, G. J. J. B., Hundt, A., Murphy, A. B., Bange, M. P., & Mai-Prochnow, A. (2018). Cold plasma treatment for cotton seed germination improvement. *Scientific Reports*, 8(1), 14372. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32692-9>
- Defraeye, T., & Martynenko, A. (2018). Electrohydrodynamic drying of food: New insights from conjugate modeling. *Journal of Cleaner Production*, 198, 269–284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.250>
- Defraeye, T., & Martynenko, A. (2018). Future perspectives for electrohydrodynamic drying of biomaterials. *Drying Technology*, 36(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1326130>
- Du, Y., Yang, F., Yu, H., Xie, Y., & Yao, W. (2022). Improving food drying performance by cold plasma pretreatment: A systematic review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(5), 4402–4421. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13027>
- Dubinov, A. E., Lazarenko, E. R., & Selemir, V. D. (2000). Effect of glow discharge air plasma on grain crops seed. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1), 180–183. <https://doi.org/10.1109/27.842898>
- Iranshahi, K., Onwude, D. I., Rubinetti, D., Martynenko, A., & Defraeye, T. (2022). Scalable electrohydrodynamic drying configuration for dehydrating biological materials at industrial scale. *Engineering Archive*, 30(2), 1–14. <https://doi.org/10.31224/2328>
- Jiang, H., Lin, Q., Shi, W., Yu, X., & Wang, S. (2022). Food preservation by cold plasma from dielectric barrier discharges in agri-food industries. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1015980. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1015980>
- Li, L., Jiang, J., Li, J., Shen, M., He, X., Shao, H., & Dong, Y. (2014). Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean. *Scientific Reports*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep05859>
- Los, A., Ziuzina, D., Boehm, D., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2019). Investigation of mechanisms involved in germination enhancement of wheat (*Triticum aestivum*) by cold plasma: Effects on seed surface chemistry and characteristics. *Plasma Processes and Polymers*, 16(4), 1–12. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800148>
- Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2018). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); Recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006>

- Ohta, T. (2016). Chapter 8 – Plasma in agriculture. In N. N. Misra, O. Schlüter, & P. J. Cullen (Eds.), *Cold plasma in food and agriculture* (pp. 205–221). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00008-1>
- Paul, A., & Martynenko, A. (2021). Electrohydrodynamic drying: Effects on food quality. *Drying Technology*, 39(11), 1745–1761. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1906694>
- Paziuk, V., Vyshnevskiy, V., Tokarchuk, O., & Kupchuk, I. (2021). Substantiation of the energy efficient schedules of drying grain seeds. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 14(63), 137–146. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2021.14.63.2.13>
- Randeniya, L. K., & de Groot, G. J. J. B. (2015). Non-thermal plasma treatment of agricultural seeds for stimulation of germination, removal of surface contamination and other benefits: A review. *Plasma Processes and Polymers*, 12(7), 608–623. <https://doi.org/10.1002/ppap.201500042>
- Scholtz, V., Šerá, B., Khun, J., Šerý, M., & Julák, J. (2019). Effects of nonthermal plasma on wheat grains and products. *Journal of Food Quality*, 7917825. <https://doi.org/10.1155/2019/7917825>
- Šerá, B., Scholtz, V., Jirešová, J., Khun, J., Julák, J., & Šerý, M. (2021). Effects of non-thermal plasma treatment on seed germination and early growth of leguminous plants – A review. *Plants*, 10(8), 1616. <https://doi.org/10.3390/plants10081616>
- Sharma, M., Kumar, A., & Guleria, C. (2023). Plasma agriculture: Pioneering sustainability through a revolutionary agricultural approach. *Indian Farming*, 73(10), 17–20. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.02273>
- Šimek, M., & Homola, T. (2021). Plasma-assisted agriculture: history, presence, and prospects – A review. *The European Physical Journal D*, 75, 1–31. <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00206-4>
- Singh, A., Orsat, V., & Raghavan, V. (2012). A comprehensive review on electrohydrodynamic drying and high-voltage electric field in the context of food and bioprocessing. *Drying Technology*, 30(16), 1812–1820. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.708912>
- Stolárik, T., Henselová, M., Martinka, M., Novák, O., Zahoranová, A., & Černák, M. (2015). Effect of low-temperature plasma on the structure of seeds, growth and metabolism of endogenous phytohormones in pea (*Pisum sativum* L.). *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 35(4), 659–676. <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9627-8>