ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493
https://elibrary.ru/FTQVFJ

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Сушка зернового материала с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда

Е. Х. А. Мунассар, И. А. Шорсткий*

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Поступила в редакцию: 22.02.2023
Принята после рецензирования: 22.03.2023
Принята к публикации: 04.04.2023

**И. А. Шорсткий: i-shorstky@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5804-7950*
Е. Х. А. Мунассар: https://orcid.org/0000-0002-8270-628X

© Е. Х. А. Мунассар, И. А. Шорсткий, 2024

Аннотация.
В пищевой и сельскохозяйственной промышленности для увеличения сроков хранения пищевых продуктов и совершенствования процессов переработки пищевого сырья и подготовительных процессов применяются электрофизические технологии, такие как озонирование, обработка импульсным электрическим полем и низкотемпературная плазменная обработка. Цель работы – исследовать влияние предварительной обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда на эффективность сушки зерновых материалов.
В качестве объекта исследования выбрали семена мягкой пшеницы. Рассмотрели три варианта воздействия на материал: обработку при прямом контакте зернового материала с электродами, обработку на диэлектрической подложке и без обработки (контрольный образец). Изучение кинетики сушки семян пшеницы проводили с помощью теплового агента при температуре 110 °C после предварительной обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда. Для оценки возникающих в результате предварительной обработки эффектов использовали средства электронной сканирующей микроскопии для выявления изменений поверхности структуры, а также изучили кинетику процесса сушки.
Обработка семян пшеницы на диэлектрической подложке способствует более интенсивному процессу удаления влаги под действием возникающих эффектов травления поверхности с образованием нового континуума в структуре зернового материала. Обработка позволяет снизить длительность сушки зернового материала до достижения кондиционной влажности на 15–25 % по сравнению с контрольным образцом. Кривые скорости демонстрируют ускорение сушки в начальный период времени, что вызвано наличием дополнительных электроосмотических сил, и изменение абсорбционных характеристик зернового материала. Снижение общего удельного потребления энергии на 20 % получили для образцов с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда.
Электрофизическая технология на базе слаботочного плазменного канала искрового разряда может быть использована для подготовки зернового материала к последующей сушке. Перспективой дальнейшего развития данного направления является масштабирование технологии с обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда зернового материала в поточном режиме с выявлением новых эффектов, в том числе повышение сроков хранения зернового материала.

Ключевые слова. Пищевое сырье, зерновой материал, сушка, электрофизические технологии, искровой разряд, озоновоздушая смесь, эффективность сушки, кинетика сушки, электроосмотическая сила

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/42. Исследования выполнялись с использованием оборудования ЦКП «Исследовательский центр пищевых и химических технологий» Кубанского государственного технологического университета (КубГТУ) (СКР_3111), развитие которого поддерживается Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) (Соглашение № 075-15-2021-679).

Для цитирования: Мунассар Е. Х. А., Шорсткий И. А. Сушка зернового материала с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 116–123. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493
https://elibrary.ru/FTQVFJ

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Drying Grain Pretreated by Low-Voltage Spark-Discharge Plasma Channel

Emad H.A. Mounasar, Ivan A. Shorstkii*

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Received: 22.02.2023
Revised: 22.03.2023
Accepted: 04.04.2023

**Ivan A. Shorstkii: i-shorstky@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5804-7950*
Emad H.A. Mounasar: https://orcid.org/0000-0002-8270-628X

© E.H.A. Mounasar, I.A. Shorstkii, 2024

Abstract.
The food industry and agriculture use such electrophysical technologies as ozonation, pulsed electric field, and low-temperature plasma. They increase the shelf-life of food products, as well as help to advance food processing. This article features pre-treatment with a low-voltage spark-discharge plasma channel as a means to increase the efficiency of grain drying.
The grain material involved three samples of soft wheat seeds. Sample 1 was subjected to direct contact with the electrodes while sample 2 underwent treatment on a dielectric substrate. The control remained untreated. The kinetics of grain-drying in the open air was studied using a thermal agent at 110°C after pre-treatment with a low-voltage spark-discharge plasma channel. This experiment also involved scanning electron microscopy tools to detect changes in surface structure.
The electron microscopy showed that the dielectric substrate accelerated moisture removal, probably as a result of the emerging surface effects that developed a new continuum in the grain structure. This treatment made it possible to reduce the drying time by 15–25%, compared to the control sample. The drying rate curves demonstrated acceleration in the initial period, associated with additional electroosmotic forces and changes in the absorption properties. The samples treated with low-voltage spark-discharge plasma channel showed a 20% reduction in total energy consumption.
Electrophysical technology based on a low-voltage spark-discharge plasma channel proved to be an effective pre-drying procedure. Further research is needed to scale the technology in a flow mode and to identify its effect on shelf-life.

Keywords. Food raw materials, grain material, drying, electrophysical technologies, spark discharge, ozone-air mix, drying efficiency, drying kinetics, electroosmotic force

Funding. The research was supported by the Kuban Science Foundation as part of research project No. MFI-20.1/42. The research was carried out using the equipment of the Research Center for Food and Chemical Technologies of Kuban State Technological University (KubSTU) (CKP_3111) financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauki) (Agreement No. 075-15-2021-679).

For citation: Mounasar EHA, Shorstkii IA. Drying Grain Pretreated by Low-Voltage Spark-Discharge Plasma Channel. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):116–123. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493

Введение

Передовые электрофизические технологии являются важным междисциплинарным направлением пищевой и сельскохозяйственной промышленности. Их целью является получение безопасных и качественных пищевых продуктов в необходимом количестве на базе возникающих электрогидродинамических эффектов и феноменов. За последнее время некоторые электрофизические технологии, такие как озонирование, обработка импульсным электрическим полем и низкотемпературная плазменная обработка, нашли широкое применение в технологиях увеличения сроков хранения пищевых продуктов, совершенствования процессов переработки пищевого сырья и подготовительных процессах [1–3]. Однако у перечисленных выше технологий есть как преимущества, так и недостатки, среди которых высокие капитальные затраты их практической реализации и высокие требования электрической безопасности при организации производственного процесса [4]. Следовательно, необходимо постоянное совершенствование указанных технологий как с точки зрения их доступности для практической реализации, так и теоретической проработки возникающих эффектов и механизмов воздействия на пищевой продукт.

Перенос тепла в слаботочном плазменном канале искрового разряда с позиции электрогидродинамики объясняется наличием вторичного потока, исходящего от ионизирующего электрода к коллектору [6, 7]. Этот вторичный поток формирует течение (ионный ветер), которое добавляет импульс к объемному потоку

и разрушает тепловой пограничный слой на нагретой стенке. Это вызывает увеличение коэффициента теплопередачи [5]. Несмотря на то что энергия поля в пересчете на кинетическую энергию ионного ветра составляет всего 0,6–1,4 %, она вносит изменения в процессы переноса тепла [6]. Из этого следует, что линейный перенос импульса мал в общем энергетическом балансе. Возникает вопрос: куда расходуется остальная энергия. Гипотеза о тепловыделении до сих пор не подтверждена экспериментально. Гипотеза о переходе энергии в энергию возбуждения атомов и молекул, которая увеличивает их электрохимический потенциал, была подтверждена фактом сильной коррозии и окисления, вызванного электрохимическими процессами на границе раздела металл-газ [8]. Однако более четкой картины происходящих процессов нет из-за отсутствия достаточного количества экспериментальных данных.

Интенсивный массоперенос при воздействии электрогидродинамического потока на пищевой продукт с низким содержанием влаги характеризуется морфологическими изменениями. В работе S. Rashidi и др. было продемонстрировано изменение структуры поверхности зернового материала при воздействии тлеющего разряда [9]. Это подтверждено исследованиями топографии поверхности и данными контактного угла смачивания. Длительность воздействия составила порядка 30 с. В работе Б. Б. Балданова и др. по снижению токсичности зернового материала с помощью обработки низкотемпературной плазмы отмечена длительность воздействия на продукт 90 с для достижения положительного эффекта [10]. Уменьшение длительности воздействия приводило к снижению получаемого эффекта. Применение низкотемпературной плазмы для сушки семян кукурузы с использованием низкотемпературной плазмы мощностью 500 Вт в течение 50 с позволило снизить ее длительность [12]. Описанные случаи характерны для варианта, при котором сушка продукта проводится с постоянным наложением электрогидродинамического потока. Данная система является статичной и сложно масштабируемой. При переходе на большие объемы использование процесса озонирования дало положительный эффект на сушку зернового материала при длительности более 40 мин [13]. Эффект сокращения длительности сушки установлен на уровне 80 %.

Особое место при использовании электрогидродинамических потоков в процессах сушки занимают комбинированные процессы при одновременном использовании сушильного агента и электроактивированного потока [14–16]. Данная комбинация позволяет сочетать традиционные эффекты на тепломассоперенос и формировать дополнительные силы интенсификации процессов сушки. Представленные выше технологии направлены на сопровождение процесса сушки различных материалов электрогидродинамическим потоком. Работы, направленные на подготовку зернового материала к последующей сушке с помощью плазменного канала искрового разряда, практически не представлены.

С учетом данной характеристики состояния проблемы в работе планируется исследовать влияние предварительной обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда на эффективность сушки зерновых материалов.

Объекты и методы исследования

Объект исследования. Семена пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) хорошего и однородного качества были приобретены у местного производителя. Начальная влажность семян составила 26,1 ± 0,1 %, ее определяли с помощью анализатора влажности Эвлас 2М (СибагроПРИБОР, Россия). Семена в оболочке (без очистки) отправляли на электрофизическую обработку.

Обработка слаботочным плазменным каналом искрового разряда. В качестве основного метода воздействия на зерновой материал использовали слаботочный плазменный канал искрового разряда. Генерацию искрового разряда осуществляли с использованием высоковольтного блока питания с максимальным выходным напряжением 30 кВ. Частота следования искровых разрядов составила порядка 600 Гц. Контроль параметров обработки осуществляли с помощью цифрового осциллографа Tektronix. Обработка проводилась по схеме, представленной на рисунке 1. Через слой зерна толщиной 2 см пропускали слаботочный плазменный канал, представляющий собой озоновоздушную смесь, и получаемые от искрового разряда ионы. Длительность обработки подобрали на основе предыдущих результатов, она составила 260 с. В качестве вариации было рассмотрено 3 опыта обработки зернового материала: контрольный образец без обработки (опыт А), при прямом контакте с электродом в режиме коронного разряда (опыт Б) и при нахождении зернового материала на диэлектрической подложке с формированием искрового разряда (опыт В). Объемная плотность электрического заряда для опыта с прямым контактом с электродами составила 10–2 Кл/м^3, а в опыте с диэлектрической подложкой ~ 10–1 Кл/м^3. Тепловой эффект от обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда составил менее 3 °С. Для этого температуру поверхности зерна измерили с помощью инфракрасного пирометра.

Морфологический анализ. Для анализа структурных и поверхностных изменений зернового материала использовали средства сканирующей электронной микроскопии. В качестве инструментария применяли растровый электронный микроскоп EVO HD 15 (Zeiss, Великобритания). Параметры работы микроскопа соответствовали величине ускоряющегося напряжения 10,0 и 15,0 кВ. Дополнительно для оценки свойств поверхности на предмет появления новых компонентов использовали опцию энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Конвективная сушка. После обработки зерновой материал направлялся на этап конвективной сушки в сушильном шкафу Экрос 4620 (Экросхим, Россия) с циркуляцией воздуха при температуре 110 °С. Сушку проводили до момента снижения влажности зернового материала до кондиционной влажности 10 %. Во время эксперимента осуществляли оценку кинетики сушки. Для этого с интервалом в 10 мин брали навеску для определения влажности зернового материала.

Кривые сушки зернового материал без обработки и с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда были проанализированы с использованием безразмерного параметра влажности (*MR*), определяемого по формуле (1) [17]:

$$MR = \frac{W_t - W_e}{W_0 - W_e} \quad (1)$$

где W_t – содержание влаги в любой момент времени *t*, кг воды/кг сухого вещества; W_0 – начальное содержание влаги, кг воды/кг сухого вещества; W_e – равновесное содержание влаги, кг воды/кг сухого вещества. В формуле (1) значение W_e мало, поэтому возможно ее упрощение до вида $MR = W_t/W_0$.

Скорость сушки (*DR*) образцов яблок в любой момент времени *t* может быть рассчитана по формуле (2):

$$DR = \frac{W_{t+\Delta t} - W_t}{\Delta t} \quad (2)$$

где W_t – содержание влаги в момент времени *t*, кг воды/кг сухого вещества; $W_{t+\Delta t}$ – содержание влаги в момент времени $t + \Delta t$.

Оценка энергетических затрат. Для оценки технико-экономической эффективности предлагаемой технологии рассчитали удельное потребление энергии по формуле (3):

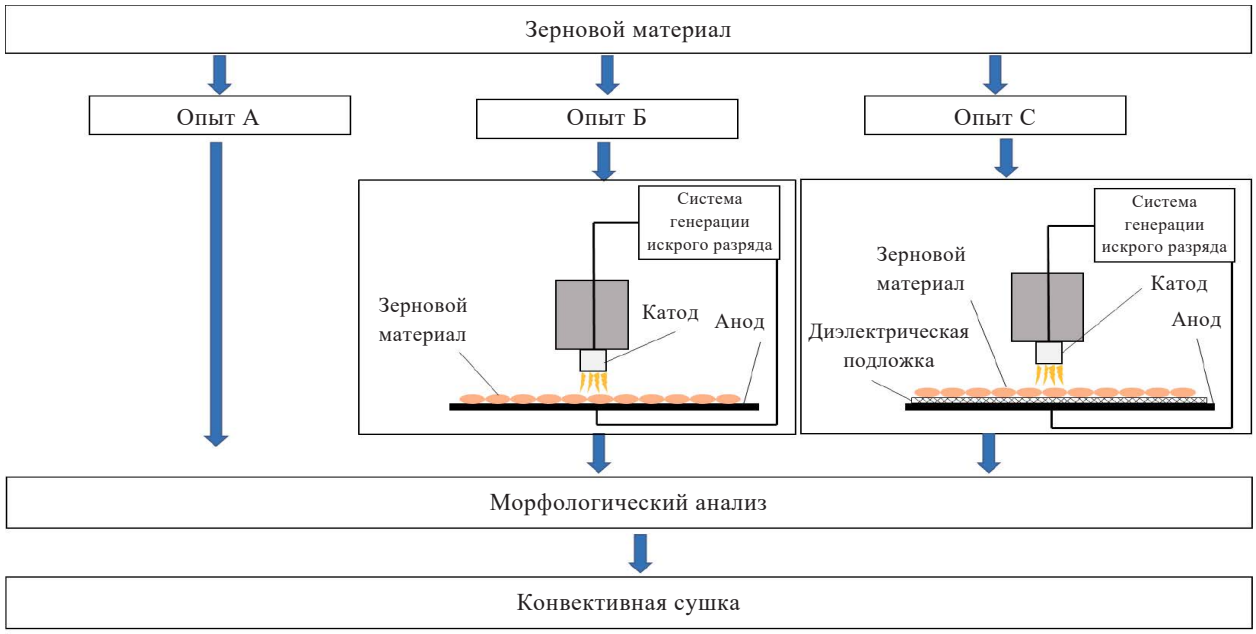
$$Q_{уд} = \frac{Q_{СУШ} + Q_{ПЛ}}{M_в} \quad (3)$$

где $Q_{СУШ}$ – энергопотребление конвективной сушилки, кВт/ч; $Q_{ПЛ}$ – энергопотребление обработки плазменным каналом на стадии предварительной подготовки, кВт/ч; $M_в$ – масса выпаренной воды, кг. Данные потребления сушильного шкафа $Q_{СУШ}$ получили с помощью измерителя мощности при постановке эксперимента. Величину потребляемой энергии плазменного канала $Q_{ПЛ}$ определяли по данным осциллограмм тока и напряжения в соответствии с формулой (4) [18]:

$$Q_{ПЛ} = n \times \int U(t) \times I(t) \times dt \quad (4)$$

где *n* – количество разрядов за обработку; *I*(*t*) – величина напряжения при разряде; *U*(*t*) – ток разряда, проходящий через образец.

Статистический анализ. Поставленные эксперименты проводились с трехкратной повторностью. Для оценки достоверности различий между иссле-



опыт А – контрольный; опыт Б – обработка слаботочным плазменным каналом искрового разряда при прямом контакте с электродом в режиме коронного разряда; опыт В – обработка зернового материала на диэлектрической подложке с формированием искрового разряда

Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для обработки зернового материала

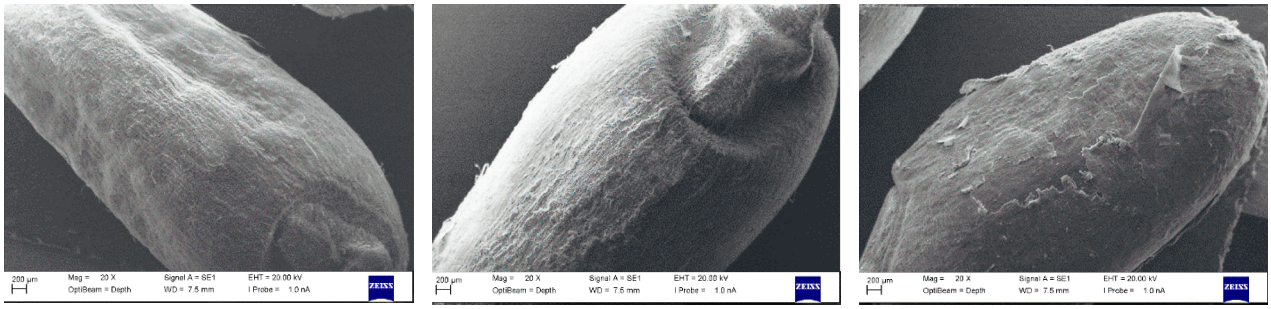
Figure 1. Experimental device for processing grain material

дуемыми параметрами провели дисперсионный анализ по методике ANOVA при $p < 0{,}05$. Статистический анализ провели в программной среде Excel и специализированной программной среде STATISTICA 13 (Statsoft, США).

Результаты и их обсуждение

Морфологические изменения зернового материала после обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда. Топография поверхности семян без обработки и после обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда показана на рисунке 2. Для необработанных семян пшеницы, полученных по опыту А, характерно наличие ровной и гладкой поверхности. По результату обработки слаботочным плазменным каналом в коронном разряде (опыт Б) на поверхности наблюдаются эффекты травления, для которых характерно резкое разделение границ единичных клеток семян. При переходе обработки в искровой режим (опыт В) на поверхности семян наблюдаются эффекты механического разрушения кожицы семян и появления нового континуума (кратеров) на поверхности зерна. При дальнейшем увеличении энергетики обработки зернового материала возникают нежелательные термические деформации, сопровождающиеся интенсивным выделением Джоулева тепла от искрового разряда.

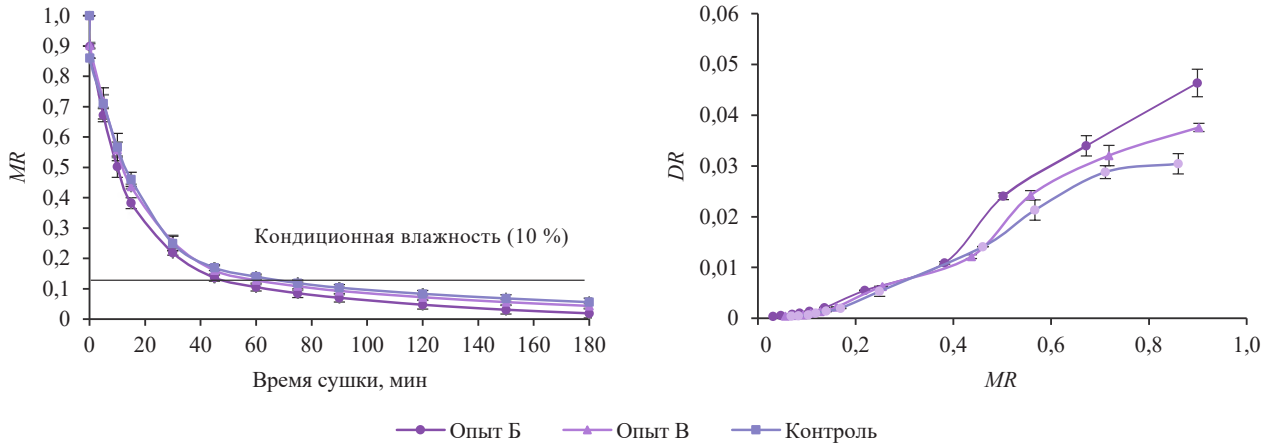
Кинетика сушки. Пропускание электроактивированного сушильного агента, содержащего озоно-воздушную смесь и группы ионов OH^-, O^- и H^+ сквозь слой зернового материала при работе в режиме искрового (опыт В) и коронного разряда (опыт Б) при атмосферном давлении с объемной плотностью электрических зарядов 10^{-2}–10^{-1} Кл/м^3, позволяет сочетать в себе максимальный эффект ускорения процесса сушки зернового материала. На рисунке 3 пред-



a b c

Рисунок 2. Топография поверхности семян без обработки и после обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда: a – без обработки; b – обработка в режиме коронного разряда; c – обработка с формированием искрового разряда

Figure 2. Grain surface without treatment and after treatment with a low-voltage spark-discharge plasma channel: a – untreated; b – processed with corona discharge; c – processed with spark discharge



a b

Рисунок 3. Кривая сушки (a) и скорости сушки (b) зернового материала для поставленных опытов

Figure 3. Curve of drying (a) and drying speed (b) of grain

ставлены кривые сушки зернового материала для поставленных опытов.

При одновременном участии озоновоздушной смеси и воздействии коронного разряда формируются три градиента, которые влияют на массоперенос: градиенты температуры, химического потенциала и электрического поля. При воздействии коронного разряда (опыт Б) влага, которая находится в зерновом материале, насыщается ионами. Возникает дополнительная сила движения влаги, основанная на эффекте электроосмоса, при котором влага, насыщенная ионами под действием электростатики, двигается к соответствующему по знаку электроду. Подобные эффекты были замечены в работах авторов, моделирующих коллоидно-пористые тела [19, 20].

Воздействие искровым разрядом атмосферного давления позволяет сочетать изменения массообменных характеристик сушки с поверхности зерна за счет изменения физико-механических характеристик влаги и микроструктурных изменений зернового материала. После электрофизического воздействия по опытам Б и В наблюдаются структурные изменения оболочки зерна: развивается мелкоячеистая сетчатая структура с резко очерченными границами ячеек. В работах [21, 22] отмечено изменение влагоабсорбционной способности при обработке низкотемпературной плазмой, что связано с интенсивностью процесса сушки. Одной из гипотез данной работы является возникновение дополнительного континуума (канала), который способствует эффективному и равномерному процессу движения влаги внутри материала. Для проверки данной гипотезы в последующих работах будет детально изучена внутренняя структура зернового материала.

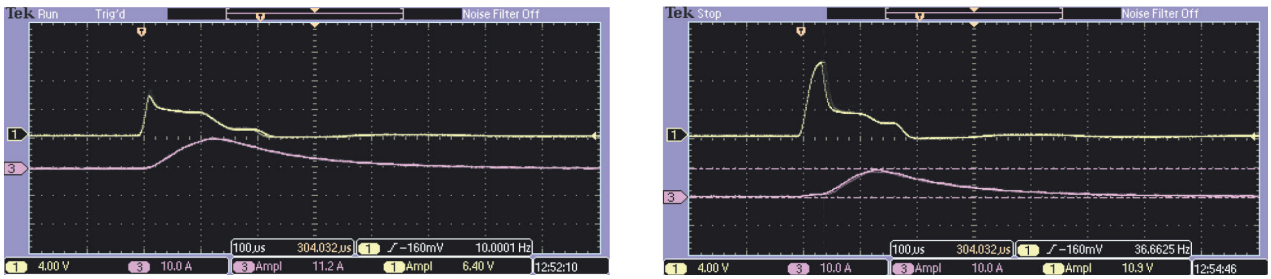
С точки зрения процесса сушки кривая представлена периодом падающей скорости сушки. Для опытов Б и В в начальный период времени (15 мин) скорость сушки выше на 15–20 % по сравнению с необработанным материалом. Максимальная скорость сушки установлена на уровне 0,046 кг/мин для образца зерна по опыту В при воздействии искровым разрядом.

В работах, посвященных воздействию низкотемпературной плазмы на зерновой материал, были указаны эффекты, ускоряющие процесс сушки. В работе W. Cao и др. указано наличие эффекта применения электрогидродинамического потока коронного разряда на шлифованный рис и процесс его сушки [23]. Было установлено, что система игольчатых электродов при подаче на них высокого напряжения до 30 кВ способствовала изменению структурных особенностей. В работе W. Cao, Y. Nishiyama и S. Koide использование электрогидродинамического потока в процессе сушки увеличило скорость сушки семян пшеницы более чем в два раза [24].

Несмотря на то что полученные в данной работе эффекты интенсификации процесса сушки ниже, чем эффекты, наблюдаемые в работах по применению электрогидродинамического потока для сопровождения с процессами сушки, использованные режимы основаны на возможном практическом применении и масштабировании. Рассмотренный процесс электрофизической обработки представлен слаботочным атмосферным разрядом, который позволяет осуществлять электрофизическую обработку без необходимости создания вакуума. Это влияет на техноэкономическую эффективность данной технологии.

Таким образом, при работе представленной технологии на малотоннажной зерносушилке (100 т сырья в сутки) предварительная электрофизическая обработка может увеличить производство примерно на 10–15 т в сутки. Это может обеспечить дополнительный доход, который увеличит как норму прибыли, так и окупаемость инвестиций в оборудование обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда. Разрабатываемые нашей исследовательской группой технологии предварительной электрофизической подготовки растительных материалов показывают высокие технологические эффекты.

Характеристики электрофизической обработки. На рисунке 4 представлена визуализация обработки слоя зернового материала слаботочным плазменным



a b

Рисунок 4. Визуализация процедуры обработки для опытов Б (a) и В (b): осциллограмма напряжения (желтая линия) и тока (фиолетовая линия) для воздуха в качестве рабочего газа: 4 кВ/дел, 10 мА/дел, 100 мкс/дел

Figure 4. Processing procedure: voltage (yellow line) and current (purple line) oscillogram with air as the working gas, 4 kV/div, 10 mA/div, 100 µs/div

каналом искрового разряда. При нахождении зернового материала на аноде режим обработки происходит при коронном разряде в межэлектродном пространстве. Для такой обработки характерно шипение, сопровождающееся генерацией электронов. В коронном режиме возникает эффект ионного ветра, описанный в работах [25, 26]. Ионный ветер представляет собой направленный аэродинамический поток заряженных частиц. Особую роль играет как конфигурация электродного пространства, так и подложка, на которой находится материал [27]. В поставленном эксперименте подложка представляется собой металлическую сетку, через которую свободно проникает ионный ветер, воздействуя на слой материала.

При размещении материала на диэлектрической подложке возникает режим работы искровым разрядом в виде шнура ярко-голубого свечения. Такая обработка характеризуется резким треском, появляющимся при возникновении искрового разряда. Осциллограммы тока разряда и напряжения представлены на рисунке 4. Для кривой тока характерно экспоненциальный рост и падение при достижении пикового значения 10 мА, величина напряжения составляет 6,4 кВ. При обработке на подложке возникает запаздывание кривой тока на 50 мкс относительно кривой напряжения, величина напряжения составляет 10,9 кВ.

Используя формулу (4) и данные осциллограммы тока и напряжения разряда, определили значение $Q_{пл}$.

Величина потребляемой энергии плазменного канала составила 1,4 и 6,8 Вт для опытов Б и В соответственно. Итоговое общее удельное потребление энергии $W_{уд}$ для предварительно обработанных слаботочным плазменным каналом искрового разряда зернового материала составило 4,2 и 4,3 кВт/ч·кг. Это ниже, чем у контрольных образцов ($p < 0,05$), и является важным показателем эффективности технологии [28]. Снижение общего удельного потребления энергии составило 22 и 25 % для опытов Б и В соответственно. Таким образом, подготовка зернового материала с помощью слаботочного плазменного канала искрового разряда может привести к снижению энергопотребления процедуры сушки.

Выводы

Предварительная обработка слаботочным плазменным каналом искрового разряда способствует снижению длительности сушки зернового материал до кондиционной влажности до 25 %. При расположении зернового материала на диэлектрической подложке эффект от электрофизической обработки выше, чем при прямом контакте зернового материала с электродом. Скорость сушки зернового материала, обработанного слаботочным плазменным каналом искрового разряда в начальный момент времени, выше, чем в материале без предварительной обработки. Процедура предварительной обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда может быть рекомендована при подготовке зернового материала к этапу сушки, учитывая факт сокращения общей длительности процесса.

Направление будущих исследований будет заключаться в изучении качественных характеристик обрабатываемого зернового материала слаботочным плазменным каналом искрового разряда, масштабировании технологии до обработки в поточном режиме и проведении поисковых работ по влиянию на хранимоустойчивость зернового материала.

Критерии авторства

Е. Х. А. Мунассар занимался проведением лабораторных экспериментов, расчетом основных показателей сушки и написанием работы. И. А. Шорсткий руководил проектом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

E.H.A. Mounasar conducted the laboratory experiments, calculated the drying parameters and wrote the manuscript. I.A. Shorstkii supervised the project.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References

1. Chisch TV, Kozmin GV, Polyackova LP, Melnickova TV. Radiation treatment as a technology accepting for food safety. Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences. 2011;11(4):44–49. (In Russ.). [Радиационная обработка как технологический прием в целях повышения уровня продовольственной безопасности / Т. В. Чиж [и др.] // Вестник РАЕН. 2011. Т. 11. № 4. С. 44–49.]. https://www.elibrary.ru/TXIKUJ

2. Shorstkii IA. Cold plasma pretreatment in plant material drying. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(3):613–622. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2391

3. Ganesan AR, Tiwari U, Ezhilarasi PN, Rajauria G. Application of cold plasma on food matrices: A review on current and future prospects. Journal of Food Processing and Preservation. 2021;45(1). https://doi.org/10.1111/jfpp.15070

4. Priyadarshini A, Rajauria G, O'Donnell CP, Tiwari BK. Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2019;59(19):3082–3101. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1483890

5. Zhakin AI. Electrohydrodynamics. Physics-Uspekhi. 2012;182(5):495–520. (In Russ.). https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201205b.0495

6. Martynenko A, Bashkir I, Kudra T. The energy efficiency of electrohydrodynamic (EHD) drying of foods. Trends in Food Science and Technology. 2021;118:744–764. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.002

7. Bashkir I, Martynenko A. Optimization of multiple-emitter discharge electrode for electrohydrodynamic (EHD) drying. Journal of Food Engineering. 2021;305. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110611

8. Martynenko A, Misra NN. Thermal phenomena in electrohydrodynamic (EHD) drying. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2021;74. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102859

9. Rashidi S, Bafekr H, Masoodi R, Languri EM. EHD in thermal energy systems – A review of the applications, modelling, and experiments. Journal of Electrostatics. 2017;90:1–14. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.08.008

10. Baldanov BB, Ranzhurov TsV, Sordonova MN, Budazhapov LV. Changes in the properties and surface structure of grain seeds under the influence of an atmospheric pressure glow discharge. Advances in Applied Physics. 2019;7(3):260–266. (In Russ.). [Изменение свойств и структуры поверхности семян зерновых культур под воздействием тлеющего разряда атмосферного давления / Б. Б. Балданов [и др.] // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 3. С. 260–266.].

11. Misra NN, Yadav B, Roopesh MS, Jo C. Cold plasma for effective fungal and mycotoxin control in foods: Mechanisms, inactivation effects, and applications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2019;18(1):106–120. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12398

12. Li S, Chen S, Han F, Xv Y, Sun H, Ma Z, *et al.* Development and optimization of cold plasma pretreatment for drying on corn kernels. Journal of Food Science. 2019;84(8):2181–2189. https://doi.org/10.1111/1750-3841.14708

13. Shtan′ko RI. Electric ozonation device for grain drying. Cand. eng. sci. diss. Zernograd: Azov-Black Sea State Agricultural Engineering Academy; 2000. 143 p. (In Russ.). [Штанько Р. И. Электроозонаторная установка для сушки зерна: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. Зерноград, 2000. 143 с.]. https://www.elibrary.ru/QDDZOD

14. Mirzaei-Baktash H, Hamdami N, Torabi P, Fallah-Joshaqani S, Dalvi-Isfahan M. Impact of different pretreatments on drying kinetics and quality of button mushroom slices dried by hot-air or electrohydrodynamic drying. LWT. 2022;155. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112894

15. Xiao A, Ding C. Effect of electrohydrodynamic (EHD) on drying kinetics and quality characteristics of shiitake mushroom. Foods. 2022;11(9). https://doi.org/10.3390/foods11091303

16. Martynenko A, Iranshahi K, Defraeye T. Plate versus mesh collecting electrode for electrohydrodynamic (EHD) drying. Drying Technology. 2022;40(13):2759–2769. https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1962338

17. Voroshilin RA, Kurbanova MG, Ostapova EV, Makhambetov EM, Petrov AN, Khelef MEA. Effect of gelatin drying methods on its amphiphilicity. Foods and Raw Materials. 2022;10(2):252–261. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-534

18. Shorstkiy IA. Pulsed electric field treatment of biomaterials in pre-drying. Krasnodar: Dom-Yug; 2020. 172 p. (In Russ.). [Шорсткий И. А. Применение обработки импульсным электрическим полем биоматериалов при подготовке к сушке. Краснодар: Дом-Юг, 2020. 172 с.]. https://www.elibrary.ru/DRFQUI

19. Polishchuk NV, Panchenko MS, Panchenko IM. Effect of the radii of quartz capillaries on water-rising in electric field. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2008;44(4):45–50. (In Russ.). [Полищук Н. В., Панченко М. С., Панченко И. М. Влияние радиусов кварцевых капилляров на высоту поднятия воды в электрическом поле // Электронная обработка материалов. 2008. Т. 44. № 4. С. 45–50.].

20. Sheikholeslami M, Seyednezhad M. Simulation of nanofluid flow and natural convection in a porous media under the influence of electric field using CVFEM. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018;120:772–781. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.087

21. Los A, Ziuzina D, Boehm D, Cullen PJ, Bourke P. 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. 2019;16(4). https://doi.org/10.1002/ppap.201800148

22. Gao X, Zhang A, Héroux P, Sand W, Sun Z, Zhan J, *et al.* Effect of dielectric barrier discharge cold plasma on pea seed growth. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2019;67(39):10813–10822. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b03099

23. Cao W, Nishiyama Y, Koide S, Lu ZH. Drying enhancement of rough rice by an electric field. Biosystems Engineering. 2004;87(4):445–451. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.12.007

24. Cao W, Nishiyama Y, Koide S. Electrohydrodynamic drying characteristics of wheat using high voltage electrostatic field. Journal of Food Engineering. 2004;62(3):209–213. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00232-2

25. Qu J, Zhang J, Li M, Tao W. Heat dissipation of electronic components by ionic wind from multi-needle electrodes discharge: Experimental and multi-physical analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020;163. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120406

26. Semenov VK, Belyakov AA, Ivanova NB. Mathematical modeling of a submerged jet of electric wind. Vestnik IGEU. 2021;(3):51–58. (In Russ.). https://doi.org/10.17588/2072-2672.2021.3.051-058

27. Martynenko A, Kudra T. Electrohydrodynamic dryer: Effect of emitters' density and gap between discharge and collecting electrodes. Drying Technology. 2020;38(1–2):158–167. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1621338

28. Pui LP, Saleena LAK. Effects of spray-drying parameters on physicochemical properties of powdered fruits. Foods and Raw Materials. 2022;10(2):235–251. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-533