



Влияние низкотемпературной атмосферной плазмы слаботоковых высоковольтных разрядов на структуру поверхности и водопоглощающую способность зернового материала



Иван А. Шорсткий¹ thegector@mail.ru  0000-0002-8270-628X
Емад Х.А. Мунассар¹ emadmounasar@gmail.com  0000-0001-5804-7950

¹ Кубанский государственный технологический университет, ул. Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия

Аннотация. Применение подготовительных электрофизических методов воздействия на пищевое сырье является одним из основных трендов развития инновационных процессов и технологий в пищевой и перерабатывающей промышленности. На базе физического эффекта эмиссии электронов от термоэмиссионного источника была получена низкотемпературная атмосферная плазма (НАП) слаботоковых высоковольтных разрядов, которую успешно применили для воздействия на зерновой материал. В качестве основных методов анализа электрофизического воздействия были рассмотрены физические характеристики и эволюция низкотемпературной атмосферной плазмы. Для оценки эффекта воздействия низкотемпературной плазмы на зерновой материал проводили измерения водопоглощающей способности и анализ модификации поверхности методами электронной сканирующей микроскопии. Экспериментально установлено, что обработка НАП способствует более интенсивному процессу водопоглощения за счет изменения поверхностной структуры зернового материала. Общая длительность процесса водопоглощения зернового материала после обработки НАП снизилась более чем в три раза до достижения равновесного влагосодержания. Сканирующая электронная микроскопия показала, что обработка НАП приводит к возникновению мелкоячеистой структуры поверхности зернового материала. Эффект обработки НАП приводит к модификации поверхности семян, заключающейся в проявлении мелкоячеистой структуры на поверхности семян. Учитывая преимущества технологии НАП, а именно отсутствие необходимости вакуумирования и малая длительность обработки, технология обладает высоким практическим потенциалом.

Ключевые слова: зерновой материал, атмосферная плазма, модификация поверхности, водопоглощение, пищевое сырье.

Effect of low current cold atmospheric plasma on grains surface structure and water absorption capacity

Ivan A. Shorstkii¹ thegector@mail.ru  0000-0002-8270-628X
Emad H.A. Mounassar¹ emadmounasar@gmail.com  0000-0001-5804-7950

¹ Kuban State University of Technology, 2, Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, Russian Federation

Abstract. The use of preparatory electrophysical methods of influencing food raw materials is one of the main trends in the development of innovative processes and technologies in the food and processing industry. Based on the physical effect of electron emission from a thermal emission source, a cold atmospheric plasma (CAP) was obtained, which was successfully applied to the grain material. Physical characteristics and evolution of low-temperature atmospheric plasma were considered as the main methods of analysis of electrophysical effects. To assess the effect of low-temperature plasma on grain material, measurements of water absorption capacity and analysis of surface modification by electron scanning microscopy were carried out. It has been experimentally established that CAP treatment contributes to a more intensive process of water absorption due to changes in the surface structure of the grain material. The total duration of the process of water absorption of grain material after processing of CAP decreased by more than three times until the equilibrium moisture content was reached. Scanning electron microscopy has shown that the processing of CAP leads to the appearance of a fine-mesh structure of the surface of the grain material. The effect of CAP treatment leads to modification of the seed surface, which consists in the manifestation of a fine-meshed structure on the surface of the seeds. Taking into account the advantages of CAP technology, namely the absence of the need for vacuuming and short processing time, the technology has a high practical potential.

Keywords: grain material, atmospheric plasma, surface modification, water absorption, food raw materials.

Введение

Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой (НАП) в последние годы начала активно использоваться в сельском хозяйстве в качестве альтернативы традиционной предпосевной обработке семян [1]. Использование технологии низкотемпературной атмосферной плазмы имеет ряд преимуществ перед традиционными технологиями: равномерность обработки, сохранение целостности семян, отсутствие химических

реагентов. Как следствие, использование плазменных технологий в сельском хозяйстве представляет собой переход к экологически чистым и безопасным технологиям [1–3]. Изначально для стимуляции прорастания семян и роста растений применялась техника холодной плазмы, основанная на коронном разряде [4, 5], ВЧ-разряда низкого давления [6], тлеющего разряда [7] и других типов источников плазмы [8, 9].

Для цитирования

Шорсткий И.А., Мунассар Е.Х. Влияние низкотемпературной атмосферной плазмы слаботоковых высоковольтных разрядов на структуру поверхности и водопоглощающую способность зернового материала // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85 № 2. С. 23–31. doi:10.20914/2310-1202-2023-2-23-31

For citation

Shorstkii I.A., Munassar E.H. Effect of low current cold atmospheric plasma on grains surface structure and water absorption capacity. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 2. pp. 23–31. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-2-23-31

Несколько последних работ сообщили об эффекте НАП для модификации поверхности семян и дальнейшего поглощения воды [10–12]. Так, в работе [10] использовали НАП для обработки семян пшеницы. Было обнаружено, что обработка плазмой незначительно влияет на прорастание пшеницы. На 12-й день контрольные семена и семена, помещенные в вакуум, имели примерно на 10% более высокую всхожесть по сравнению с образцами, обработанными плазмой. Другие авторы [11] изучали влияние обработки НАП на прорастание семян и рост проростков сои. Было обнаружено, что поглощение воды семенами улучшилось на 14,03%, а краевой угол смачивания – на 26,19%. В работе [12] применяли НАП для улучшения прорастания семян хлопка. Результаты показали, что 27-минутная обработка НАП с использованием воздуха может значительно увеличить характеристики поглощения воды семенами (до 25%), улучшить прорастание в тепле, прорастание в метаболическом тесте на охлаждение и увеличить морозоустойчивость семян хлопчатника. Обработка холодной атмосферной плазмой была изучена в работе [13]. Было установлено, что НАП имеет большой потенциал для модификации функциональных свойств пищевых и зерновых продуктов. Обработка НАП (длительностью 5–30 мин при 80 кВ) повысила гидратационные свойства муки за счет структурных изменений. В работе [14] сообщили о влиянии НАП на химический состав поверхности семян и модификацию их характеристик. Сообщалось, что контактный угол смачивания был значительно изменен прямым воздействием обработки НАП длительностью 60 секунд.

Одно из возможных объяснений механизма улучшения прорастания и роста семян растений под воздействием электрофизической обработки заключается в том, что плазменная обработка вызывает структурные изменения на поверхности семян [15–17]. Авторы [8] отметили, что на прорастание семян сильно влияют химические реакции на поверхности семян, инициированные воздействием плазмы. Кроме того, авторами [10] было отмечено, что плазменная обработка семян улучшает смачиваемость поверхности семян, что, в свою очередь, приводит к повышению всхожести семян. Таким образом, основной механизм обработки холодной плазмой основан на улучшении поглощения воды посредством модификации поверхности семян.

В разрезе применения низкотемпературной атмосферной плазмы стоит отметить направление слаботочных высоковольтных разрядов, работающих в Туандсендском режиме. В таких разрядах микроплазменный поток на базе импульсной микроплазмы при атмосферном давлении был использован для биологической деконтаминации [18]. Поскольку он работает при атмосферном давлении, нет необходимости в каком-либо

вакуумном оборудовании, что делает установку для обработки портативной. В дополнение к этому, несмотря на высокую температуру электронов, средняя температура газа близка к комнатной из-за низкой энергии ионов; следовательно, подходит для обработки термочувствительных объектов без влияния на их объемные характеристики [18].

На основании вышеприведенной информации авторами работы было интересно проверить влияние низкотемпературной атмосферной плазмы слаботочных высоковольтных разрядов на структуру поверхности и водопоглощающую способность зернового материала.

Материалы и методы

В качестве материала для исследования была выбрана яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.), полученная от местного производителя (Краснодар, Россия). Исходное содержание влаги в образцах зерен составляло $10,2 \pm 0,3\%$, измеренное гравиметрическим методом в сушильном шкафу при 103 °C [19] и перепроверено анализатором влажности Эвлас-2М (Сибагроприбор, Россия).

Семена пшеницы обрабатывали низкотемпературной атмосферной плазмой в соответствии с планом эксперимента, представленного на рисунке 1. Образцы пшеницы были разделены на две группы: необработанные образцы и образцы с электрообработкой (опыт А: НАП с силой тока $I = 5$ мА, опыт Б: НАП с $I = 10$ мА и опыт В: стримерный разряд). Далее проводилась оценка контактного угла смачивания, водопоглощения и микроструктурный анализ.

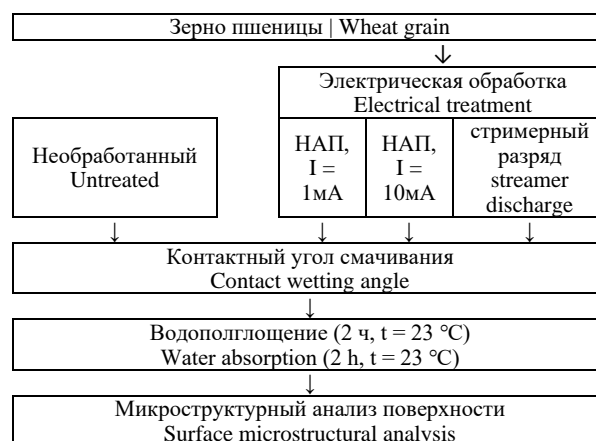


Рисунок 1. Схема проведения испытаний и анализа
Figure 1. Schematic of testing and analysis

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2. В качестве источника положительных прямоугольных высоковольтных импульсов использовалась система, состоящая из функционального генератора Agilent 33220A (Agilent Technologies, США) и высоковольтного усилителя Matsusada 20-B-20. (Matsusada Precision Inc, Япония). Максимальное выходное напряжение усилителя составляло 20 кВ.

Низкотемпературная атмосферная плазма возникала при поддержке источника термоэлектронной эмиссии (ТЭ) в виде нити накала (значение активного сопротивления $R_e = 2 \text{ Ом}$, $V = 1,0 \text{ В}$). Амплитудные, длительно-импульсные и формообразующие характеристики тока и напряжения разряда контролировались с помощью осциллографа Twktronix TDS 220 через выход монитора тока и напряжения на высоковольтном усилителе.

Была рассмотрена следующая постановка эксперимента. Зерно пшеницы помещали в диэлектрическую ячейку между электродами без прямого контакта с ними. Расстояние между образцом и электродами составляло $\approx 4 \text{ мм}$. Канал потока разряда располагался перпендикулярно поверхности зерна, как показано на рисунке 2.

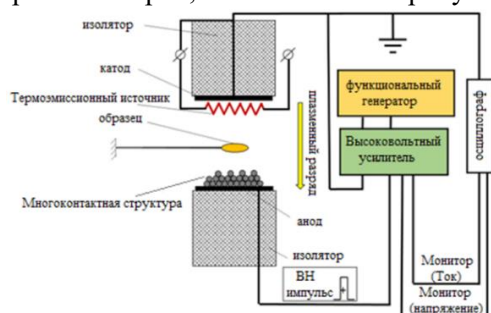


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки
Figure 2. Schematic diagram of the experimental setup

Во избежание образования механических ионных каналов при плазменной обработке использовали многоострый анод. Микрочастицы Fe_3O_4 со средним диаметром 60 мкм наносились на поверхность анода в соответствии с технологией [20].

После обработки НАП образцы размещали в контейнере водяной бани с дистиллированной водой при температуре 20°C (Grant OLS 200, Уилтшир, Великобритания). Общее время водопоглощения составило 120 минут. Для получения кинетических кривых водопоглощения все образцы измерялись с интервалами 5, 10, 30, 60 и 120 минут. Для этого увлажненные образцы периодически извлекали, удаляли поверхностную влагу с помощью фильтровальной ткани, анализировали и возвращали в контейнер.

Растровая электронная микроскопия EVO HD 15 (Zeiss, Великобритания) (работающая при ускоряющем напряжении $10,0 \text{ кВ}$ и $15,0 \text{ кВ}$ и оснащенная энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией) была использована для наблюдения морфологических особенностей и изменений поверхности после плазменной обработки.

Изменение свойств поверхности характеризовалось контактным углом смачивания θ , который определялся методом лежащей капли [26] с использованием поверхностного микроскопа. Значения углов смачивания определялись с помощью программного пакета DropSnake – LB-ADSA.

Результаты

Быстрые электроны, стартующие с поверхности катода, ускоряются в прикатодном слое под действием внешнего электрического поля. На рисунке 3а представлены экспериментальные результаты вольтамперных характеристик для опытов А, Б и В. Полученная вольтамперная характеристика демонстрирует зависимость, характерную для Туансендовского разряда при низких значениях тока при межэлектродном зазоре 10 мм . При этом величина тока для опытов А, Б и В поддерживается на уровне 2, 10 и 15 мА .

Разряд низкотемпературной атмосферной плазмы в конфигурации "многоострый анод – пластинчатый катод" в соответствии с опытом Б показан на рисунок 3б.

Плазменный канал ярко-белого свечения формируется в межэлектродном промежутке при подаче на анод импульса напряжения положительной полярности. На рисунке 3с показана осциллограмма для протокола В напряжения на электродах лабораторной установки и тока разряда в межэлектродном пространстве при атмосферном давлении воздушной среды. Осциллограмма тока четко показывает задержку увеличения электронного тока относительно момента приложения напряжения на 80 мкс . Затем, через 80 мкс , ток достигает уровня 10 мА в виде яркой нити (рисунок 3б). Продолжительность микроплазменного тока существенно зависит от приложенного напряжения. В частности, длительность составляет 520 мкс при $U = 13,5 \text{ кВ}$ для протокола А и 650 мкс при $U = 14,9 \text{ кВ}$ для протокола В.

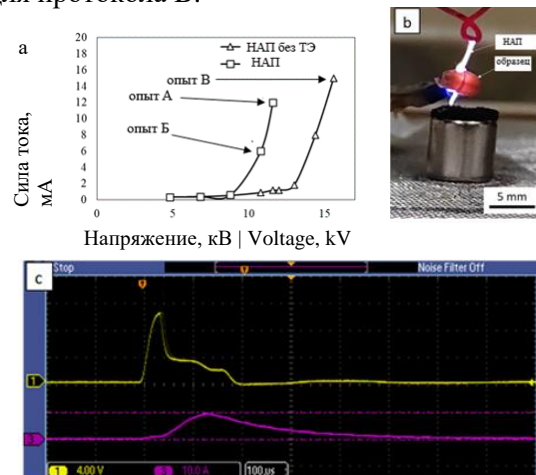


Рисунок 3. Вольт-амперные характеристики для протоколов А, Б и В при межэлектродном зазоре 10 мм (а), визуализация процедуры обработки НАП (б), осциллограмма напряжения (желтая линия) и тока (фиолетовая линия) для воздуха в качестве рабочего газа: 4 кВ/дел ; 10 мА/дел ; 100 мкс/дел

Figure 3. Volt-ampere characteristics for protocols A, B and C at an interelectrode gap of 10 мм (a), visualization of the HAP processing procedure (b), oscillogram of voltage (yellow line) and current (purple line) for air as working gas: 4 кВ/дел ; 10 мА/дел ; 100 мкс/дел

Для характеристики свойств поверхности семян пшеницы, обработанных НАП, использовались значения контактных углов смачивания (рисунок 4).

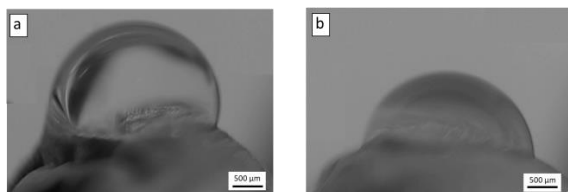


Рисунок 4. Капля воды на поверхности семян пшеницы без обработки (a) и после обработки НАП по опыту Б (b)
Figure 4. Water drop on the surface of wheat seeds without treatment (a) and after HAP treatment in experiment B (b)

Исходная поверхность семян пшеницы характеризуется относительно высокими значениями угла смачивания $\theta = 106^\circ$ (на водной основе) и низкой поверхностной энергией γ . В результате обработки НАП семян пшеницы поверхность становится гидрофильной и характеризуется низкими значениями угла смачивания $\theta = 58^\circ$, а поверхностная энергия γ значительно увеличивается.

Топография поверхности семян до и после обработки НАП показана на рисунок 5. Оболочка семян пшеницы в контрольной группе (рисунок 5, a) представляет собой достаточно ровную и гладкую поверхность. В результате воздействия обработки НАП на оболочку семян (рисунок 5, b) по опыту А на поверхности наблюдались структурные изменения, заключающиеся в проявлении

мелкоячеистой структуры с резко выраженными границами клеток. При дальнейшем увеличении длительности воздействия (опыт Б) или энергии разряда эффект травления поверхности семян усиливался. При переходе к стримерному разряду (опыт В) на поверхности зерна происходили разрушения защитной оболочки в результате обработки (рисунок 5, c).

Семена являются чрезвычайно сложным биологическим объектом, и воздействие низкотемпературной атмосферной плазмы на семена может происходить по нескольким каналам: путем модификации поверхностного слоя семян, за счет реакций с участием электронов, ионов и активных радикалов, ультрафиолетового плазменного излучения и т. д. [8]. С другой стороны, параметры плазменной обработки, такие как свойства плазмы, энергия, состав рабочего газа также оказывают значительное влияние на реакцию семян при воздействии плазмы [1, 2, 29]. Одним из наиболее важных факторов плазменной обработки является величина тока. Так, при низкоэнергетическом воздействии НАП (опыт А) наблюдается незначительный эффект модификации поверхности семян, но, в то же время, значительное увеличение энергии (опыт В) оказывает негативное влияние на семена [10, 30]. Еще одним важным фактором, который необходимо учитывать при плазменной обработке, является вид семян, так как семена различных видов растений могут по-разному реагировать на обработку НАП.

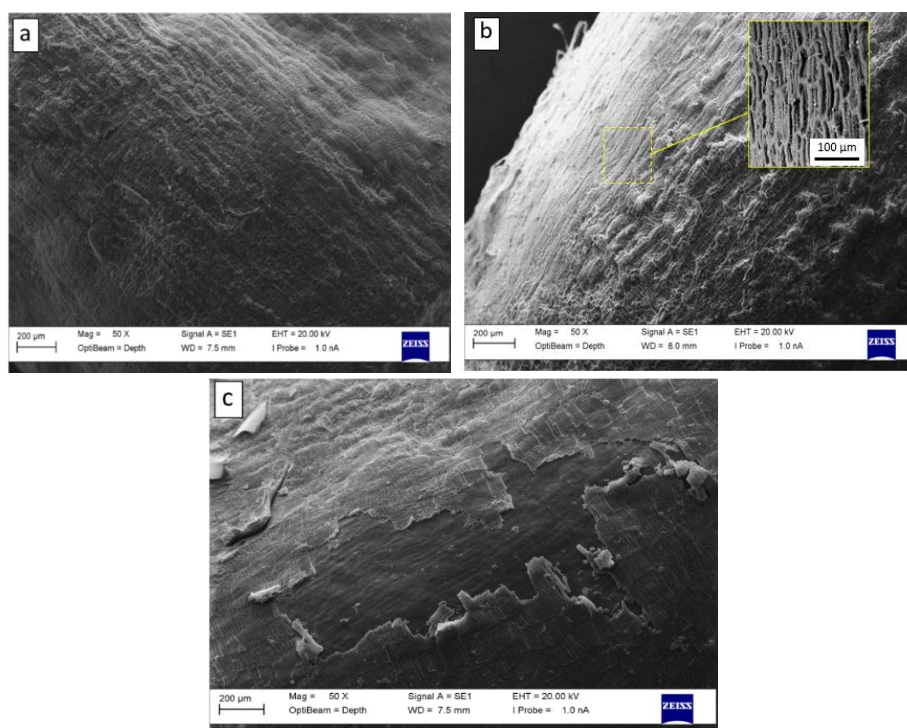


Рисунок 5. Изображения сканирующего электронного микроскопа поверхности семян пшеницы в зоне обработки НАП: без обработки (a), обработка по опыту Б (b), обработка по опыту В (c). Выделенный участок демонстрирует ячеистую структуру
Figure 5. Scanning electron microscope images of wheat seed surface in the area of HAP treatment: without treatment (a), treatment according to experiment B (b), treatment according to experiment C (c). The highlighted area shows a cellular structure

В ряде исследований было отмечено, что плазменная обработка вызывает изменения на поверхности семян [31–33]. Авторами [32] сообщалось, что в результате плазменной обработки поверхности семян пшеницы и овса наблюдались изменения поверхности. Микрофотографии, полученные при сканирующей электронной микроскопии, показали, что после обработки НАП поверхность семян имеет характер травления. Аналогичный эффект был обнаружен [5] при плазменной обработке семян риса. Изменение свойств поверхности семян после плазменной обработки может интенсифицировать перенос кислорода и воды через оболочку семян [31, 32, 34]. В работе [34] было обнаружено, что после плазменной обработки происходит увеличение количества воды в семенах тмина (по сравнению с контрольными образцами).

Кривые поглощения воды необработанными и обработанными НАП образцами по выбранным опытам для зерен пшеницы представлены на рисунке 6. В начальный период замачивания кривая обработанных НАП семян демонстрирует резкий скачок водопоглощения с последующим выходом на плато. При этом стоит отметить, что образцы, обработанные по опыту В с применением стримеров, показали меньший эффект в отличие от образцов, обработанных по опытам А и Б. Как видно из рисунка 6, водопоглощение образцами, обработанными НАП, увеличилось до значения содержания влаги 27, 26,5 и 25% для протоколов Б, А и В соответственно. Образцы зерен пшеницы, обработанные по протоколу Б, показали максимальное поглощение воды.

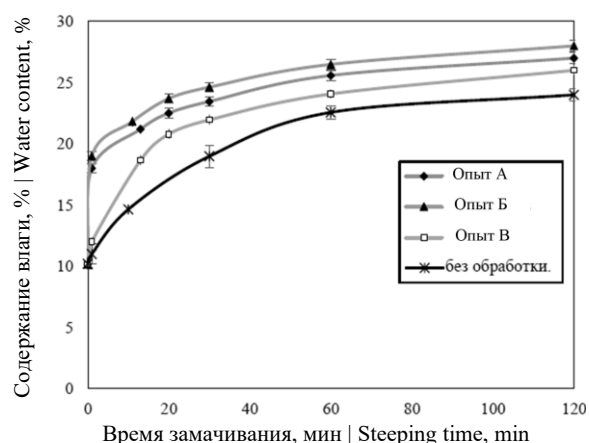


Рисунок 6. Содержание влаги в зернах пшеницы во время гидратации при различных протоколах обработки НАП

Figure 6. Moisture content of wheat grains during hydration under different NAP treatment protocols

Полученные данные свидетельствуют об ускорении процесса поглощения воды семенами пшеницы, обработанными низкотемпературной атмосферной плазмой. Установлено, что более высокое и интенсивное поглощение воды положительно коррелирует с увеличением энергии обработки НАП. В случае режима применения НАП 10 мА наиболее яркое различие было заметно в начальный момент времени, когда семена поглотили на 25,1% больше воды по сравнению с контрольным образцом (рисунок 6). Напротив, более высокий уровень энергии (> 10 мА) вызывает снижение динамики поглощения воды в семенах, обработанных НАП, и, возможно, вызывает повреждение семян вследствие Джоулева тепловыделения. Эти результаты свидетельствуют о том, что обработанные НАП семена впитывают влагу значительно быстрее по сравнению с необработанными семенами. Полученные данные коррелируют с литературными данными о том, что обработка НАП способствовала увеличению поглощения воды до 23,3% через первые 2 часа [16].

Обсуждение

Проведено исследование влияния низкотемпературной атмосферной плазмы слаботочных высоковольтных разрядов на модификацию поверхности семян пшеницы и эффективности водопоглощения. В качестве метода обработки использована авторская методика генерации низкотемпературной атмосферной плазмы при поддержке термоэлектронной эмиссии. Для оценки воздействия применяли анализ поверхности семян методами сканирующей электронной микроскопии и угла смачивания. Значительные модификации поверхности семян пшеницы наблюдались при обработке НАП, не превышающей значения тока 10 мА. Как показали данные исследования поверхности, эффекты травления, вызванные обработкой НАП формируют дополнительный континуум (канал), который способствует более эффективному и равномерному процессу переноса влаги. Такие результаты согласуются с результатами работ при обработке тлеющим разрядом [9].

В данном исследовании наблюдался резкий скачок водопоглощения на начальной стадии для семян, обработанных НАП. Результаты исследования авторов [11] по применению низкотемпературной плазмы к семенам сои продемонстрировали аналогичные результаты.

Также, возможно, что микроплазменный поток участвует в модификации кристаллитов структуры зерна, что приводит к образованию трещин и каналов в структуре семян пшеницы.

При этом, в работе [29] установлено проявление трещин в результате обработки НАП зерен риса. С точки зрения автора, по сравнению с рисом, имеющим твердую овальную структуру в поперечном сечении, зерна пшеницы могут демонстрировать иное поведение. Поперечное сечение ядра пшеницы имеет бороздку [35], что в свою очередь может снизить фактор напряжения во время проникновения микроплазменного потока.

На основании полученных данных можно предположить, что значительные модификации поверхности семян пшеницы напрямую связаны не только с водопоглощением семян, но и с ускорением прорастания.

Кроме того, эффект ускорения водопоглощения может быть основан на эффекте электроосмоса, при котором насыщенная ионами влага под действием электростатики перемещается к соответствующему электроду [36]. Как известно гидрофильность поверхности семян приводит к ускорению прорастания семян, что является одним из направлений развития данной работы.

Заключение

Применение низкотемпературной атмосферной плазмы слаботочных высоковольтных разрядов может быть использовано для модификации поверхности семян и ускорения водопоглощения зернами пшеницы. Увеличение приложенной энергии НАП может привести

к значительному улучшению водопоглощения. Однако, при переходе к стримерному разряду увеличение тока приводит к негативным эффектам: термический дефект и возникновение продуктов горения. Обработка НАП продемонстрировала влияние на поверхность семян с образованием мелкоячеистой структуры. Данная модификация может способствовать образованию дополнительного континуума (канала), который приводит к более эффективному и равномерному водопоглощению.

Благодаря преимуществам обработки низкотемпературной атмосферной плазмы слаботочных высоковольтных разрядов (однородность обработки, отсутствие разрушения семян, отсутствие новых химических образований), данная технология может стать эффективной альтернативой традиционной предпосевной обработке семян, применяемой в настоящее время в сельском хозяйстве.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/42. Исследования в части моделирования проводились на оборудовании Научно-исследовательского центра пищевых и химических технологий КубГТУ (СКР_3111), разработка которого поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-679).

Литература

- 1 Misra N.N., Schlüter O., Cullen P.J. Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications. Academic Press, 2016. P. 205–221. doi: 10.1016/B978-0-12-801365-6.00008-1.
- 2 Ekezie F.G.C., Sun D.W., Cheng J.H. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends // Trends in food science & technology. 2017. V. 69. P. 46-58. doi: 10.1016/j.tifs.2017.08.007
- 3 Hashizume H., Kitano H., Mizuno H., Abe A. et al. Improvement of yield and grain quality by periodic cold plasma treatment with rice plants in a paddy field // Plasma Processes and Polymers. 2021. V. 18. №. 1. P. 2000181. doi: 10.1002/ppap.202000181
- 4 Mravljje J., Regvar M., Vogel-Mikuš K. Development of cold plasma technologies for surface decontamination of seed fungal pathogens: Present status and perspectives // Journal of Fungi. 2021. V. 7. №. 8. P. 650. doi: 10.3390/jof7080650
- 5 Misnal M.F.I., Redzuan N., Zainal M.N.F., Ahmad N. et al. Cold Plasma: A Potential Alternative for Rice Grain Postharvest Treatment Management in Malaysia // Rice Sci. 2022. V. 29. № 1. P. 1–15. doi: 10.1016/j.rsci.2021.12.001
- 6 Filatova I., Lyushkevich V., Goncharik S., Zhukovsky A. et al. The effect of low-pressure plasma treatment of seeds on the plant resistance to pathogens and crop yields // Journal of Physics D: Applied Physics. 2020. V. 53. №. 24. P. 244001. doi: 10.1088/1361-6463/ab7960
- 7 Дубинов А.Е., Лазаренко Е.Р., Селемир В.Д. Влияние воздушной плазмы тлеющего разряда на семена зерновых культур // IEEE Транзакции по плазменной науке. 2000. Т. 28. № 1. С. 180–183. doi: 10.1109/27.842898
- 8 Scholtz V., Šerá B., Khun J., Šerý M et al. Effects of Nonthermal Plasma on Wheat Grains and Products // J. Food Qual. 2019. 7917825. doi: 10.1155/2019/7917825
- 9 Балданов Б.Б., Ранжуров Т.Б., Сордонова М.Н., Будажапов Л.В. Изменение свойств и структуры поверхности зерен под воздействием тлеющего разряда при атмосферном давлении // Доклады по физике плазмы. 2020. Т. 46. № 1. С. 110–114. doi: 10.1134/S1063780X2001002X
- 10 Randeniya L.K., de Groot G.J.J.B. Non-Thermal Plasma Treatment of Agricultural Seeds for Stimulation of Germination, Removal of Surface Contamination and Other Benefits: A Review // Plasma Process. Polym. 2015. V.12 (7). P. 608–623. doi: 10.1002/ppap.201500042
- 11 Li L., Jiang J., Li J., Shen M. et al. Effects of Cold Plasma Treatment on Seed Germination and Seedling Growth of Soybean // Sci. Rep. 2014. V. 4 (1). P. 1–7. doi: 10.1038/srep05859
- 12 de Groot, G.J.J.B., Hundt A., Murphy A.B., Bange M.P. et al. Cold Plasma Treatment for Cotton Seed Germination Improvement // Sci. Rep. 2018. V. 8 (1). P. 14372. doi: 10.1038/s41598-018-32692-9

- 13 Chaple S., Sarangapani C., Jones J., Carey E. et al. Effect of Atmospheric Cold Plasma on the Functional Properties of Whole Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Grain and Wheat Flour // *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2020. V. 66. P. 102529. doi: 10.1016/j.ifset.2020.102529
- 14 Los A., Ziuzina D., Boehm D., Cullen P.J. et al. Investigation of Mechanisms Involved in Germination Enhancement of Wheat (*Triticum Aestivum*) by Cold Plasma: Effects on Seed Surface Chemistry and Characteristics // *Plasma Process. Polym.* 2019. V. 16 (4). P. 1–12. doi: 10.1002/ppap.201800148
- 15 Zhang B., Li R., Yan J. Study on Activation and Improvement of Crop Seeds by the Application of Plasma Treating Seeds Equipment // *Arch. Biochem. Biophys.* 2018. V. 655. P. 37–42. doi: 10.1016/j.abb.2018.08.004
- Stolárik T., Henselová M., Martinka M., Novák O. et al. Effect of Low-Temperature Plasma on the Structure of Seeds, Growth and Metabolism of Endogenous Phytohormones in Pea (*Pisum Sativum* L.) // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2015. V. 35 (4). P. 659–676. doi: 10.1007/s11090-015-9627-8
- 16 Karim N., Shishir M.R.I., Bao T., Chen W. Effect of Cold Plasma Pretreated Hot-Air Drying on the Physicochemical Characteristics, Nutritional Values and Antioxidant Activity of Shiitake Mushroom // *J. Sci. Food Agric.* 2021. doi: 10.1002/jsfa.11296
- 17 Pothiraja R., Lackmann J.-W., Keil G., Bibinov N. et al. Biological Decontamination Using Pulsed Filamentary Microplasma Jet. In *Plasma for Bio-Decontamination // Medicine and Food Security*; Springer. 2012. P. 45–55.
- 18 Ahn J.Y., Kil D.Y., Kong C., Kim B.G. Comparison of Oven-Drying Methods for Determination of Moisture Content in Feed Ingredients // *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 2014. V. 27 (11). P. 1615–1622. doi: 10.5713/ajas.2014.14305
- 19 Шпорсткий И.А., Яковлев Н. Метод формирования поглощающего материала на основе магнитоуправляемых частиц Fe₃O₄ // *Неорганические материалы: прикладные исследования.* 2020. V. 11 (5). doi: 10.1134/S2075113320050317
- 20 Реймер Л.А. Сканирующая электронная микроскопия: Физика формирования изображений и микроанализа. Спрингер, 2013. Т. 45.
- 21 Westover T.L., Franklin A.D., Cola B.A., Fisher T.S. et al. Photo- and thermionic emission from potassium-intercalated carbon nanotube arrays // *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena.* 2010. V. 28. №. 2. P. 423–434. doi: 10.1116/1.3368466
- 22 James M.C., Fogarty F., Zulkarnay R., Fox N.A. et al. A review of surface functionalisation of diamond for thermionic emission applications // *Carbon.* 2021. V. 171. P. 532–550. doi: 10.1016/j.carbon.2020.09.019
- 23 Liang S.J., Ang L.K. Electron thermionic emission from graphene and a thermionic energy converter // *Physical Review Applied.* 2015. V. 3. №. 1. P. 014002. doi: 10.1103/PhysRevApplied.3.014002
- 24 Sommerfeld A. *Electrodynamics: Lectures on Theoretical Physics.* Academic Press, 2013. V. 3.
- 25 Tang H., Cheng X. Measurement of Liquid Surface Tension by Fitting the Lying Droplet Profile // *Measurement.* 2022. V. 188. P. 110379. doi: 10.1016/j.measurement.2021.110379
- 26 Шпорсткий И.А., Яковлев Н. Экспериментальное исследование таунсендовского разряда с многоточечным катодом на динамической платформе из магнитоуправляемых частиц Fe и Fe – Al // *Журнал технической физики.* 2021. Т. 66 (8). С. 1276–1285. doi: 10.1134/S1063784221080144
- 27 Шпорсткий И.А. Предварительная обработка холодной плазмой при сушке растительного сырья // *Пищевые процессы. Техника и технология пищевых производств.* 2022. Т. 52. № 3. С. 613–622. doi: 10.21603/2074-9414-2022-3-2391
- 28 Yodpitak S., Mahatheeranont S., Boonyawan D., Sookwong P. et al. Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice // *Food chemistry.* 2019. V. 289. P. 328–339. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.03.061
- 29 Henselová M., Slováková Ľ., Martinka M., Zahoranová A. Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma // *Biologia.* 2012. V. 67. P. 490–497. doi: 10.2478/s11756-012-0046-5
- 30 Dhayal M., Lee S.Y., Park S.U. Using low-pressure plasma for *Carthamus tinctorium* L. seed surface modification // *Vacuum.* 2006. V. 80. №. 5. P. 499–506. doi: 10.1016/j.vacuum.2005.06.008
- 31 Sera B., Spatenka P., Serý M., Vrchotova N. et al. Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and early growth // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2010. V. 38. №. 10. P. 2963–2968. doi: 10.1109/TPS.2010.2060728
- 32 Петрухина Д.И., Полякова И.В., Горбатов С.А. биоцидная эффективность нетермальной аргоновой плазмы атмосферного давления // *Пищевые процессы. Техника и технология пищевых производств.* 2021. V. 51 (1). P. 86–97. doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-86-97
- 33 Rasooli Z., Barzin G., Mahabadi T.D., Entezari M. Stimulating effects of cold plasma seed priming on germination and seedling growth of cumin plant // *South African Journal of Botany.* 2021. V. 142. P. 106–113. doi: 10.1016/j.sajb.2021.06.025
- 34 Rathjen J.R., Strounina E.V., Mares D.J. Water movement into dormant and non-dormant wheat (*Triticum aestivum* L.) grains // *Journal of experimental botany.* 2009. V. 60. №. 6. P. 1619–1631. doi: 10.1093/jxb/erp037
- 35 Qiu L., Zhang M., Tang J., Adhikari B. et al. Innovative technologies for producing and preserving intermediate moisture foods: A review // *Food research international.* 2019. V. 116. P. 90–102. doi: 10.1016/j.foodres.2018.12.055
- 36 Misnal M.F.I., Redzuan N., Zainal M.N.F., Ibrahim R.K.R. et al. Emerging cold plasma treatment on rice grains: A mini review // *Chemosphere.* 2021. V. 274. P. 129972. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129972

References

- 1 Misra N.N., Schlüter O., Cullen P.J. Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications. Academic Press, 2016. pp. 205–221. doi: 10.1016/B978-0-12-801365-6.00008-1
- 2 Ekezie F.G.C., Sun D.W., Cheng J.H. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *Trends in food science & technology.* 2017. vol. 69. pp. 46–58. doi: 10.1016/j.tifs.2017.08.007
- 3 Hashizume H., Kitano H., Mizuno H., Abe A. et al. Improvement of yield and grain quality by periodic cold plasma treatment with rice plants in a paddy field. *Plasma Processes and Polymers.* 2021. vol. 18. no. 1. pp. 2000181. doi: 10.1002/ppap.202000181

- 4 Mravlje J., Regvar M., Vogel-Mikuš K. Development of cold plasma technologies for surface decontamination of seed fungal pathogens: Present status and perspectives. *Journal of Fungi*. 2021. vol. 7. no. 8. pp. 650. doi: 10.3390/jof7080650
- 5 Misnal M.F.I., Redzuan N., Zainal M.N.F., Ahmad N. et al. Cold Plasma: A Potential Alternative for Rice Grain Postharvest Treatment Management in Malaysia. *Rice Sci*. 2022. vol. 29. no. 1. pp. 1–15. doi: 10.1016/j.rsci.2021.12.001
- 6 Filatova I., Lyushkevich V., Goncharik S., Zhukovsky A. et al. The effect of low-pressure plasma treatment of seeds on the plant resistance to pathogens and crop yields. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020. vol. 53. no. 24. pp. 244001. doi: 10.1088/1361-6463/ab7960
- 7 Dubinov A.E., Lazarenko E.R., Selemir V.D. The influence of air plasma from a glow discharge on grain seeds. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2000. vol. 28. no. 1. pp. 180–183. doi: 10.1109/27.842898 (in Russian).
- 8 Scholtz V., Šerá B., Khun J., Šerý M et al. Effects of Nonthermal Plasma on Wheat Grains and Products. *J. Food Qual*. 2019. 7917825. doi: 10.1155/2019/7917825
- 9 Baldanov B.B., Ranzhurov T.V., Sordonova M.N., Budazhapov L.V. Changes in the properties and structure of the surface of grains under the influence of a glow discharge at atmospheric pressure. *Reports on plasma physics*. 2020. vol. 46. no. 1. pp. 110–114. doi: 10.1134/S1063780X2001002X (in Russian).
- 10 Randeniya L.K., de Groot G.J.J.B. Non-Thermal Plasma Treatment of Agricultural Seeds for Stimulation of Germination, Removal of Surface Contamination and Other Benefits: A Review. *Plasma Process. Polym*. 2015. vol. 12 (7). pp. 608–623. doi: 10.1002/ppap.201500042
- 11 Li L., Jiang J., Li J., Shen M. et al. Effects of Cold Plasma Treatment on Seed Germination and Seedling Growth of Soybean. *Sci. Rep*. 2014. vol. 4 (1). pp. 1–7. doi: 10.1038/srep05859
- 12 de Groot, G.J.J.B., Hundt A., Murphy A.B., Bange M.P. et al. Cold Plasma Treatment for Cotton Seed Germination Improvement. *Sci. Rep*. 2018. vol. 8 (1). pp. 14372. doi: 10.1038/s41598-018-32692-9
- 13 Chaple S., Sarangapani C., Jones J., Carey E. et al. Effect of Atmospheric Cold Plasma on the Functional Properties of Whole Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Grain and Wheat Flour. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol*. 2020. vol. 66. pp. 102529. doi: 10.1016/j.ifset.2020.102529
- 14 Los A., Ziuzina D., Boehm D., Cullen P.J. et al. Investigation of Mechanisms Involved in Germination Enhancement of Wheat (*Triticum Aestivum*) by Cold Plasma: Effects on Seed Surface Chemistry and Characteristics. *Plasma Process. Polym*. 2019. vol. 16 (4). pp. 1–12. doi: 10.1002/ppap.201800148
- 15 Zhang B., Li R., Yan J. Study on Activation and Improvement of Crop Seeds by the Application of Plasma Treating Seeds Equipment. *Arch. Biochem. Biophys*. 2018. vol. 655. pp. 37–42. doi: 10.1016/j.abb.2018.08.004
- 16 Stolárik T., Henselová M., Martinka M., Novák O. et al. Effect of Low-Temperature Plasma on the Structure of Seeds, Growth and Metabolism of Endogenous Phytohormones in Pea (*Pisum Sativum* L.). *Plasma Chem. Plasma Process*. 2015. vol. 35 (4). pp. 659–676. doi: 10.1007/s11090-015-9627-8
- 17 Karim N., Shishir M.R.I., Bao T., Chen W. Effect of Cold Plasma Pretreated Hot-Air Drying on the Physicochemical Characteristics, Nutritional Values and Antioxidant Activity of Shiitake Mushroom. *J. Sci. Food Agric*. 2021. doi: 10.1002/jsfa.11296
- 18 Pothiraja R., Lackmann J.-W., Keil G., Bibinov N. et al. Biological Decontamination Using Pulsed Filamentary Microplasma Jet. In *Plasma for Bio-Decontamination. Medicine and Food Security*; Springer. 2012. pp. 45–55.
- 19 Ahn J.Y., Kil D.Y., Kong C., Kim B.G. Comparison of Oven-Drying Methods for Determination of Moisture Content in Feed Ingredients. *Asian-Australasian J. Anim. Sci*. 2014. vol. 27 (11). pp. 1615–1622. doi: 10.5713/ajas.2014.14305
- 20 Shorstkiy I.A., Yakovlev N. Method of forming an absorbing material based on magnetically controlled Fe₃O₄ particles. *Inorganic materials: applied research*. 2020. vol. 11 (5). doi: 10.1134/S2075113320050317 (in Russian).
- 21 Reimer L.A. *Scanning electron microscopy: The physics of imaging and microanalysis*. Springer, 2013. vol. 45. (in Russian).
- 22 Westover T.L., Franklin A.D., Cola B.A., Fisher T.S. et al. Photo- and thermionic emission from potassium-intercalated carbon nanotube arrays. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*. 2010. vol. 28. no. 2. pp. 423–434. doi: 10.1116/1.3368466
- 23 James M.C., Fogarty F., Zulkharnay R., Fox N.A. et al. A review of surface functionalisation of diamond for thermionic emission applications. *Carbon*. 2021. vol. 171. pp. 532–550. doi: 10.1016/j.carbon.2020.09.019
- 24 Liang S.J., Ang L.K. Electron thermionic emission from graphene and a thermionic energy converter. *Physical Review Applied*. 2015. vol. 3. no. 1. pp. 014002. doi: 10.1103/PhysRevApplied.3.014002
- 25 Sommerfeld A. *Electrodynamics: Lectures on Theoretical Physics*. Academic Press, 2013. vol. 3.
- 26 Tang H., Cheng X. Measurement of Liquid Surface Tension by Fitting the Lying Droplet Profile. *Measurement*. 2022. vol. 188. pp. 110379. doi: 10.1016/j.measurement.2021.110379
- 27 Shorstkiy I.A., Yakovlev N. Experimental study of a Townsend discharge with a multipoint cathode on a dynamic platform of magnetically controlled Fe and Fe – Al particles. *Journal of Technical Physics*. 2021. vol. 66 (8). pp. 1276–1285. doi: 10.1134/S1063784221080144 (in Russian).
- 28 Shorstkiy I.A. Preliminary treatment with cold plasma during drying of plant raw materials. *Food processes. Equipment and technology of food production*. 2022. vol. 52. no. 3. pp. 613–622. doi: 10.21603/2074-9414-2022-3-2391 (in Russian).
- 29 Yodpitak S., Mahatheeranont S., Boonyawan D., Sookwong P. et al. Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice. *Food chemistry*. 2019. vol. 289. pp. 328–339. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.03.061
- 30 Henselová M., Slovákova Ľ., Martinka M., Zahoranová A. Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma. *Biologia*. 2012. vol. 67. pp. 490–497. doi: 10.2478/s11756-012-0046-5
- 31 Dhayal M., Lee S.Y., Park S.U. Using low-pressure plasma for *Carthamus tinctorius* L. seed surface modification. *Vacuum*. 2006. vol. 80. no. 5. pp. 499–506. doi: 10.1016/j.vacuum.2005.06.008


- 32 Sera B., Spatenka P., Serý M., Vrchotova N. et al. Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and early growth. IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. vol. 38. no. 10. pp. 2963-2968. doi: 10.1109/TPS.2010.2060728
- 33 Petrukhina D.I., Polyakova I.V., Gorbato S.A. biocidal effectiveness of non-thermal argon plasma at atmospheric pressure. Food processes. Equipment and technology of food production. 2021. vol. 51 (1). pp. 86–97. doi: 10.21603/2074–9414–2021–1–86–97 (in Russian).
- 34 Rasooli Z., Barzin G., Mahabadi T.D., Entezari M. Stimulating effects of cold plasma seed priming on germination and seedling growth of cumin plant. South African Journal of Botany. 2021. vol. 142. pp. 106-113. doi: 10.1016/j.sajb.2021.06.025
- 35 Rathjen J.R., Strounina E.V., Mares D.J. Water movement into dormant and non-dormant wheat (*Triticum aestivum* L.) grains. Journal of experimental botany. 2009. vol. 60. no. 6. pp. 1619-1631. doi: 10.1093/jxb/erp037
- 36 Qiu L., Zhang M., Tang J., Adhikari B. et al. Innovative technologies for producing and preserving intermediate moisture foods: A review. Food research international. 2019. vol. 116. pp. 90-102. doi: 10.1016/j.foodres.2018.12.055
- 37 Misnal M.F.I., Redzuan N., Zainal M.N.F., Ibrahim R.K.R. et al. Emerging cold plasma treatment on rice grains: A mini review. Chemosphere. 2021. vol. 274. pp. 129972. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129972

Сведения об авторах

Иван А. Шорсткий к.т.н., доцент, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, Кубанский государственный технологический университет, ул. Московская, 2, г. Краснодар, Краснодарский край 350072, Россия, thegector@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8270-628X>

Емад Х.А. Мунассар аспирант, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, Кубанский государственный технологический университет, ул. Московская, 2, г. Краснодар, Краснодарский край 350072, Россия, emadmounasar@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

Вклад авторов

Иван А. Шорсткий обеспечение ресурсами, подготовка эксперимента, проведение экспериментов, формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов

Емад Х.А. Мунассар формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, проведение расчетов, испытаний образцов, формулировка выводов

Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Ivan A. Shorstkii Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technological equipment and life support systems department, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya Str., 350072, Krasnodar, Russia, thegector@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8270-628X>

Emad H.A. Mounassar graduate student, technological equipment and life support systems department, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya Str., 350072, Krasnodar, Russia, emadmounasar@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

Contribution

Ivan A. Shorstkii provision of the resources, preparation and management of the experiments, conducting the experiments, formation of the main concept, goal and objectives of the study; writing the text, formulation of the conclusions.

Emad H.A. Mounassar formation of the main concept, goal and objectives of the study; writing the text, conducting the calculations, testing the samples, formulation of the conclusions

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/04/2023	После редакции 03/05/2023	Принята в печать 22/05/2023
Received 12/04/2023	Accepted in revised 03/05/2023	Accepted 22/05/2023