

*На правах рукописи*



**Тарасов Ярослав Андреевич**

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
УСТАНОВКИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ СЕМЕННОГО  
КАРТОФЕЛЯ ПРИ ХРАНЕНИИ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии  
и электрооборудование в сельском хозяйстве

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Краснодар – 2022**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ)

Научный руководитель **Никитенко Геннадий Владимирович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Нормов Дмитрий Александрович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Грубилина», профессор кафедры «Физики» (г. Краснодар)

**Большин Роман Геннадьевич**  
кандидат технических наук, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина, доцент кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина (г. Москва)

Ведущая организация: **Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ**  
(г. Зерноград)

Защита состоится «12» июля 2022 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, корпус факультета механизации, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г., размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор  
Фролов Владимир Юрьевич



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Согласно Указа Президента Российской Федерации от 21.07.2016 № 350 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в интересах развития сельского хозяйства», необходимо проводить разработки, направленные на создание и внедрение до 2026 г. конкурентоспособных отечественных технологий, основанных на новейших достижениях науки и обеспечивающих производство, переработку и хранение сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия.

Проблема сохранения качества продукции имеет большое народно-хозяйственное значение. Потеря урожая при хранении все еще велика: при уборке урожая, транспортировании и хранении теряется 30-40% выращенного урожая, в некоторых случаях к концу хранения потери достигают 60%.

Одним из путей снижения потерь семенного картофеля при хранении является применение различных способов, направленных на повышения сохранности продукции. К основным современным способам воздействия на картофель относятся: метод активного вентилирования, обработка клубней при загрузке в хранилище биологическими, химическими защитно-стимулирующими средствами, а также ингибиторами прорастания.

Основные требования, которые предъявляются к методам воздействия на семенной картофель - это безопасность, технологичность и экономичность. К сожалению, применение промышленных технологий и техники не гарантирует от потери массы картофеля в процессе лежки в связи с его дыханием, испарением воды и поражения клубней бактериями и грибами.

Следовательно, разработка новых технологий и недорогих установок для крестьянско-фермерских хозяйств, которые предназначены для предварительной обработки семенного картофеля перед закладкой на хранение, с целью снижения потери массы в процессе лежкости, является актуальной задачей на сегодняшний день.

Наиболее малоизученным в настоящее время представляются исследования, связанные с изучением влияния магнитных полей на сохранность клубней картофеля при длительном хранении. Поэтому создание технических устройств для магнитной обработки се-

менного картофеля и выявление наиболее эффективных конструктивно-технологических параметров установок считается актуальной задачей на текущий момент времени.

Работа выполнялась по заказу Министерства сельского хозяйства РФ. Гос. контракт № 082-03-2018-162 на выполнение научно-исследовательских работ по теме «Исследование и разработка рекомендаций по использованию электротехнических способов обработки клубней и корнеплодов для повышения качества хранимой продукции».

**Степень разработанности темы.** Различные исследования в нашей стране и за рубежом посвящены использованию магнитной обработки семян, растений, овощных культур. Известно множество положительных опытов по использованию тепловых, электромагнитных или других физических воздействий на семена с тем, чтобы их обеззаразить. В г. Челябинск - Басов А.М., Изаков Ф.Я. с сотрудниками успешно использовали для этого поле коронного разряда. В г. Москва, г. Красноярск - Бородин И.Ф., Цугленок Н.В. с сотрудниками эффективно применяют для обеззараживания энергию электромагнитных полей высокой и сверхвысокой частоты. В нашей стране и за рубежом исследования в этой области проводились такими учеными, как Большин Р.Г., Гинзбург А.С., Евреинов М.Г., Ксёنز Н.В., Лебедев С.П., Лысаков А.А., Никитенко Г.В., Нормов Д.А., Прищеп Л.Г., Тарушкин В.И., а также последователями их научных школ. Применение магнитных технологий в обработке овощных растений абсолютно безопасно для человека и для овощей, и способно увеличить многие показатели от прорастания до объема урожая или содержания питательных веществ любой выращиваемой культурой во время хранения.

В Ставропольском ГАУ длительное время ведутся исследования, направленные на применение магнитных технологий в агропромышленном комплексе, в том числе обработки картофеля.

Хороший эффект влияющий на хранение семенного картофеля получен в результате обработки клубней магнитным полем на основе постоянных неодимовых магнитов. Однако необходимо разработать максимально адаптированную к условиям

фермерского хозяйства установку для обработки картофеля и соответствующее оборудование по его применению.

Проблема состоит в следующем: с одной стороны, доказана эффективность применения магнитной обработки картофеля для увеличения сроков хранения, однако отсутствует установка и технология обработки с заданными параметрами.

**Научная гипотеза.** Исследование и моделирование магнитных полей в установке с постоянными магнитами позволит установить ее рациональные конструктивно-технологические параметры и рекомендовать режимы обработки семенного картофеля для уменьшения потерь при хранении.

**Целью работы** является обоснование конструктивно-технологических параметров установки магнитной обработки семенного картофеля для уменьшения потерь при хранении.

**Задачи исследования.**

1. Произвести анализ способов хранения и установок для возможной магнитной обработки клубней семенного картофеля.

2. Разработать конструкцию устройства для магнитной обработки семенного картофеля перед его закладкой на хранение в фермерских хозяйствах.

3. Разработка инженерной методики с использованием метода магнитных цепей для расчета характеристик магнитного поля внутри рабочей емкости установки для обработки семенного картофеля.

4. Осуществить компьютерное моделирование в электронной среде ELCUT, с целью визуализации распределения магнитных силовых линий в рабочей емкости, определения расположения неодимовых магнитов, нахождения рационального расстояния между ними и установления их минимального количества.

5. Экспериментально проверить работоспособность установки для магнитной обработки семенного картофеля и снять функциональные зависимости, подтверждающие теоретические положения.

6. Исследовать влияние воздействия на семенной картофель переменного, постоянного магнитного полей и поля, создаваемого от неодимовых магнитов. Определить при воздействии, какого

магнитного поля происходит наименьшая потеря массы клубней картофеля.

7. Выполнить оценку технико-экономической эффективности и разработать рекомендации по внедрению.

**Методы исследования:** были основаны на теории магнитных полей, компьютерном моделировании, натурном эксперименте, табличной и визуальной интерпретации. По результатам математического и электронного моделирования обработка проводилась на ЭВМ с использованием пакетов программ ELCUT 6.1, MathCad 14, MS Excel 2013, Coil 32, CorelDRAW X7 v.14.

**Объект исследования** – установка на постоянных магнитах барабанного типа для уменьшения потерь семенного картофеля при условиях длительного хранения в фермерских хозяйствах.

**Предмет исследования** – параметры и режимы установки на постоянных магнитах для обработки семенного картофеля.

#### **Научная новизна работы.**

1. Разработана инженерная методика расчета параметров магнитного поля установки методом цепей, предложена принципиальная схема магнитной системы в рабочей емкости, состоящей из прямоугольных неодимовых постоянных магнитов.

2. На основании результатов компьютерного моделирования установлена связь между характеристиками магнитного поля, количеством неодимовых магнитов, расстоянием между ними в объеме установки.

3. Получены графические зависимости, доказывающие эффективность использования в магнитной системе неодимовых магнитов, влияющих на повышение концентрации магнитных силовых линий.

4. Установлена зависимость между потерей массы при хранении семенного картофеля и магнитной индукцией, полученной в результате магнитной обработки.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается:

- обоснована принципиальная схема магнитной системы, в состав которой входят постоянные магниты с прямоугольными магнитными полюсами, позволяющие получить значения

магнитной индукции в рабочей зоне и необходимое время для обработки картофеля;

- предложена методика расчета на основании схемы замещения магнитной системы и получены аналитические уравнения для нахождения параметров магнитной цепи установки;

- создана установка на постоянных магнитах с прямоугольными магнитными полюсами, патент на изобретение RU 2716110 С1, которая подтвердила свою работоспособность и предлагаемый эффект после обработки семенного картофеля магнитными полями;

- предложена математическая модель расчета магнитопровода одной секции установки на основе схемы замещения и теории магнитных цепей, позволяющая определить значения индукции в различных местах объекта исследования;

- получены рекомендации с использованием результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, устанавливающие связь между величиной магнитной индукции и конфигурацией установки, прямоугольных магнитных полюсов, расстояния между ними и времени обработки;

- результаты расчетов магнитной индукции в рабочей емкости с применением электронной среды Mathcad, которые могут быть использованы для проектирования установок магнитной обработки семенного картофеля.

**Реализация результатов исследований.** Методические рекомендации по созданию магнитной установки для снижения потерь семенного картофеля переданы для практической реализации в крестьянско-фермерское хозяйство «Фатнев В.И.»; в филиал ФГБУ «Госсорткомиссия» Красногвардейский ГСУ, а также использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Ставропольский ГАУ».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научно-практических конференциях электроэнергетического факультета СтГАУ (2018-2021гг., г. Ставрополь); на 19-ой Международной научной конференции «Engineering for Rural Development» (2020 г., Латвия, г. Елгава); на 20-ой Международной научной конференции «Engineering for Rural

Development» (2021 г., Латвия, г. Елгава); на XII Международной научно-практической конференции «Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона» (2018 г., г. Ставрополь); результаты научной работы были отмечены дипломом и медалью за участие в грантовой программе УМНИК (г. Ставрополь, 2017 г.); награждены двумя золотыми медалями на выставках РОСБИОТЕХ (г. Москва, 2018, 2019 гг.); отмечены дипломом за 1 место второго этапа Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства Российской Федерации в номинации «Технические науки» (г. Нальчик, 2018 г.); удостоены диплома первой степени на конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.).

**На защиту выносятся:**

- принципиальная магнитная схема установки для определения расположения магнитов при обработке клубней семенного картофеля на постоянных магнитах;
- математические модели физических процессов, протекающих в установке для расчета магнитной индукции при обработке картофеля;
- конструктивно-технологические параметры и режимы работы установки, необходимые для получения магнитной индукции и времени обработки клубней картофеля;
- результаты сопоставления теоретических и экспериментальных данных при работе магнитной установки.
- конструкция установки на постоянных магнитах для обработки семенного картофеля с целью снижения потерь при хранении (Патент на изобретение RU 2716110 C1, 05.03.2020).

**Публикации результатов работы.** По материалам диссертационной работы опубликовано 18 научных работ, из них 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 – статьи входящие в наукометрическую базу данных Scopus, 2 - Web of Science, получено 2 патента РФ на изобретения.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 123



наименований и приложений. Диссертация изложена на 123 страницах машинописного текста, включая 10 страниц приложений, содержит 55 рисунков, 19 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрывается актуальность исследований, приведены цель работы, научная новизна, практическая значимость, и представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ существующих способов хранения семенного картофеля, в результате которого было установлено, что наибольшей популярностью пользуются методы активного вентилирования, химического и биологического протравливания клубней. Несмотря на высокую эффективность традиционных способов повышения лежкости клубней картофеля все они имеют один недостаток – высокие материальные затраты.

Основная проблема хранения семенного картофеля - большие потери массы (10-15%) и высокие энергозатраты на поддержания параметров микроклимата, требуют поиска новых технологических решений и способов предварительной обработки клубней перед закладкой на хранение.

В результате проведенных научных исследований было установлено, что для небольших фермерских хозяйств с целью повышения лежкости семенного картофеля и снижения энергозатрат можно использовать магнитные технологии. Однако, в настоящее время отсутствуют научно-обоснованные рекомендации по разработке технических устройств, обоснованию режимов и параметров их работы, что сдерживает широкое внедрение установок и технологию в крестьянско-фермерские хозяйства.

Изучение обработки семенного картофеля магнитными полями, перед закладкой на хранение, невозможно без разработки математических моделей и компьютерного моделирования физических процессов, протекающих внутри рабочей емкости установки.

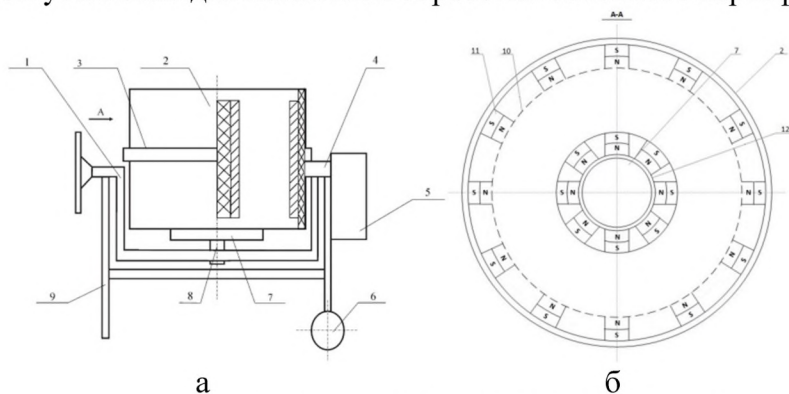
Отсутствие достоверной информации, а также недостаточная изученность магнитной обработки семенного картофеля привело к

выдвижению научной гипотезы: исследование и моделирование магнитных полей в установке с постоянными магнитами позволит установить ее рациональные конструктивно-технологические параметры и рекомендовать режимы обработки семенного картофеля для уменьшения потерь при хранении.

Исходя, из выдвинутой научной гипотезы были сформулированы цель работы и задачи исследования.

**Во второй главе** приведены результаты теоретических исследований - математического и компьютерного моделирования установки для магнитной обработки семенного картофеля.

На рисунке 1 представлены фронтальный и горизонтальный разрезы установки для магнитной обработки семенного картофеля.



а – фронтальный разрез, б – горизонтальный разрез

Рисунок 1 – Установка магнитной обработки клубней семенного картофеля

Установка магнитной обработки семенного картофеля содержит: 1- механизм отклонения и фиксации; 2 - рабочую емкость; 3 - зубчатую передачу; 4 – передаточный механизм; 5 – электродвигатель; 6 – колеса; 7 - неподвижный немагнитный цилиндр; 8 – вал; 9- основание; 10 - пластиковый вкладыш; 11 - плоские прямоугольные постоянные неодимовые магниты класса n35; 12 – внутренний немагнитный цилиндр.

Работа установки осуществляется следующим образом. После загрузки партии картофеля в рабочую емкость и запуска электродвигателя она начинает вращаться на валу вокруг своей оси.

При вращении рабочей емкости под углом  $45^\circ$  картофель оказывается в зоне силовых магнитных линий, создаваемых плоскими прямоугольными постоянными неодимовыми магнитами, расположенными на внешней поверхности внутреннего немагнитного цилиндра и внутренней поверхности пластмассового корпуса рабочей емкости. Картофель, подвергшийся магнитной обработке, после отключения электродвигателя, с помощью механизма наклона и фиксации удаляется из рабочей емкости. Для перемещения установки на небольшие расстояния в конструкции предусмотрена колесная пара.

С целью расчета параметров магнитного поля установки для обработки семенного картофеля следует разработать, на основе метода магнитных цепей, математический алгоритм.

На рисунке 2 представлено расположение магнитов, находящихся в одной секции рабочей емкости установки и распределение магнитных потоков между ними. Рисунок содержит постоянные неодимовые магниты, расположенные по отношению друг, к другу разными полюсами.

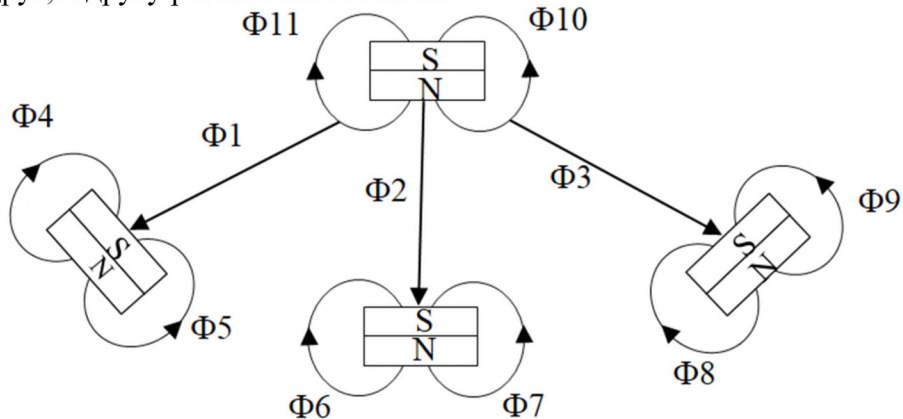


Рисунок 2 – Расположения магнитов одной секции рабочей емкости установки и распределение магнитных потоков между ними

Из рисунка 2 видно, что для обработки картофеля используются магнитные потоки  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ , а все остальные являются потоками рассеяния и практически не участвуют в процессе омагничивания клубней. Для расчета значений магнитных

потоков и величины магнитной индукции, требуемой для эффективной обработки картофеля, предлагается схема замещения (рис. 3), направленные от источников магнитодвижущих сил (МДС) потоки  $\Phi$  при распределении по секции встречают магнитные сопротивления  $R$  участков цепи.

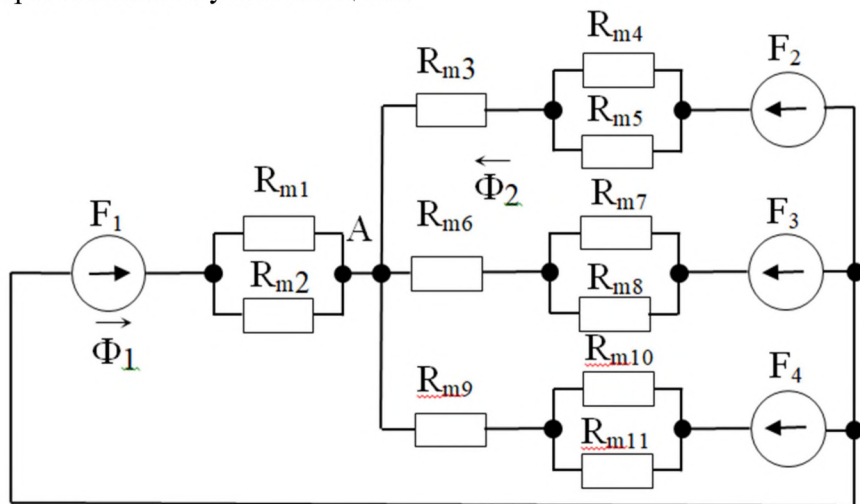


Рисунок 3 – Схема замещения магнитной цепи одной секции установки с прямоугольными магнитными полюсами

Все воздушные промежутки между магнитами представляются в виде магнитных сопротивлений, а сами магниты рассматриваются как источники магнитного поля, создающие магнитодвижущие силы. Так как, расположение магнитов и расстояние между ними во всех секциях рабочей емкости одинаково, а магниты имеют идентичные характеристики, то расчет, магнитных сопротивлений, возможно, произвести для одной секции установки.

Расчет схемы замещения осуществляется методом наложения. При расчете магнитных цепей по методу наложения руководствуются следующим правилом. Поочередно рассчитывают магнитные потоки, возникающие от действия каждой из МДС, удаляя из схемы все остальные, а затем находят магнитные потоки в ветвях путем алгебраического сложения частичных магнитных потоков.

Величины суммарных магнитных сопротивлений  $R_{\Sigma}$  и значения магнитных потоков  $\Phi$  рассчитываются с использованием систем уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\Sigma_1} = \frac{R_{m1}R_{m2}}{R_{m1} + R_{m2}}; \\ R_{\Sigma_2} = R_{m3} + \frac{R_{m4}R_{m5}}{R_{m4} + R_{m5}}; \\ R_{\Sigma_3} = R_{m6} + \frac{R_{m7}R_{m8}}{R_{m7} + R_{m8}}; \\ R_{\Sigma_4} = R_{m9} + \frac{R_{m10}R_{m11}}{R_{m10} + R_{m11}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \frac{F_1}{R''_{\Sigma_1}}; \\ \Phi_2 = \frac{F_2}{R''_{\Sigma_2}}; \\ \Phi_3 = \frac{F_3}{R''_{\Sigma_3}}; \\ \Phi_4 = \frac{F_4}{R''_{\Sigma_4}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $R_{\Sigma_1}, R_{\Sigma_2}, R_{\Sigma_3}, R_{\Sigma_4}$  – суммарные магнитные сопротивления, А/Вб;  $F$  – магнитодвижущая сила, А;  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  – магнитные потоки, Вб.

Суммарная магнитная проводимость, Вб/А определяется по выражению

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{1}{R'_{\Sigma}}. \quad (3)$$

Объем магнитной фигуры находится исходя из уравнения

$$V_m = \frac{\Phi_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где  $\Phi_{\Sigma}$  – суммарный магнитный поток, Вб.

Величина магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре рассчитывается по уравнению

$$B_{\delta} = \frac{\mu_0 V_m}{\delta}, \quad (5)$$

где  $\delta$  – воздушный зазор между магнитами, м;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, Г/м.

С целью визуализации распределения магнитных потоков внутри рабочей зоны установки для магнитной обработки семенного картофеля, определения минимального количества неодимовых магнитов и расстояния между ними необходимо прибегнуть к компьютерному моделированию.

Моделирование осуществлялось в электронной среде Elcut. Электронная программа для расчета магнитных полей создана на основе метода конечных элементов (МКЭ).

При использовании МКЭ уравнение Пуассона в частных производных для цилиндрической системы координат представляется в следующем виде

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v\partial}{r\partial r} (rA) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v\partial}{r\partial z} (rA) \right) = F, \quad (6)$$

где  $v = \frac{1}{\mu \mu_0}$  – удельное магнитное сопротивление;  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества, Г/м;  $A$  – вектор магнитного потенциала;  $r$ ,  $z$  – цилиндрические координаты, м.

Применительно к предлагаемой конструкции, для сокращения количества дифференциальных уравнений наиболее мелкая конечно-элементная сетка должна покрывать только рабочий участок между постоянными магнитами, тогда уравнение Пуассона можно переписать с учетом разности радиусов  $r = r_1 - r_2$  (рис. 4).

Уравнение Пуассона для воздушного пространства между двумя постоянными магнитами, выделенного сектора, без учета абсолютной магнитной проницаемости вещества ( $\mu = 1$ ) записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu_0(r_1 - r_2)} \frac{\partial}{\partial(r_1 - r_2)} (r_1 - r_2) A \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_0(r_1 - r_2)} \frac{\partial}{\partial(r_1 - r_2)} (r_1 - r_2) A \right) = F_1 + F_2 + F_3 + F_4. \quad (7)$$

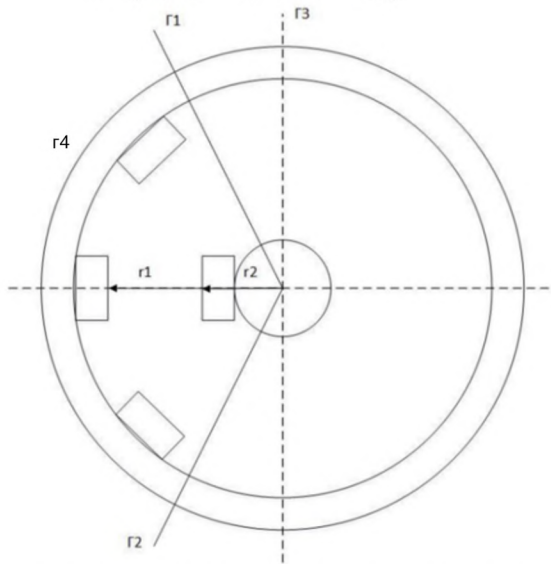


Рисунок 4 – Схематическое изображение сектора рабочей зоны установки с наложением граничных условий

Если значения МДС указанных магнитов одинаковы, то правую часть уравнения (7) можно представить в общем виде  $mF = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$ , где  $m$  – количество МДС.

Граничные условия области определения решения имеют вид:  $A = 0$  на  $\Gamma_1, \Gamma_2$  и  $\Gamma_4$ ;  $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$  на  $\Gamma_3$ .

Для решения уравнения (7) в МКЭ применяется вариационное исчисление, которое позволяет использовать энергетический метод, заключающийся в замене краевой задачи для уравнения Пуассона задачей о минимуме функционала энергии:

$$F = \iint_{\Omega} \left[ \frac{1}{2\mu_0} \left( \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + \frac{1}{(r_1 - r_2)^2} \frac{\partial^2 (r_1 - r_2) A}{\partial (r_1 - r_2)^2} \right) - mFA \right] \partial\Omega, \quad (8)$$

где  $\partial\Omega = 2\pi(r_1 - r_2)dz$ .

Если в области  $\Omega$  имеется  $n$  вершин  $l$  треугольников, а  $F^m$  представляет вклад треугольника  $k$  в общую функцию, то минимум этой функции определяется путем решения системы уравнений

$$\frac{\partial F}{\partial A_p} = 0, \quad (9)$$

где  $p = 1, 2, 3, \dots, n$  – номера узлов.

Опуская ряд преобразований, присущие стандартному алгоритму расчета по методу конечных элементов, можно перейти к конечным выражениям для нахождения величины магнитной индукции в центре каждого треугольника рабочего пространства.

Вектор магнитной индукции внутри треугольного элемента

$$B_i^l = \sqrt{(Br^2 + Bz^2)}. \quad (10)$$

В результате компьютерного моделирования была получена картина распределения магнитных силовых линий в рабочем

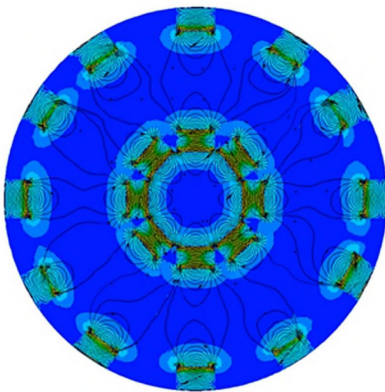


Рисунок 5 – Распределение магнитных силовых линий по сечению установки для магнитной обработки семенного картофеля

пространстве установки для магнитной обработки картофеля (рис. 5). Компьютерное моделирование осуществлялось для разного количества неодимовых магнитов в рабочей емкости: 12, 16 и 20. На рисунке 6 представлены графические зависимости, связывавшие между собой магнитную индукцию, количество магнитов и расстояние между ними. Для эффективной обработки клубней картофеля необходимо, чтобы значения магнитной индукции в рабочем зазоре емкости находились в диапазоне 60 - 70 мТл, а магниты располагались на расстоянии 100 - 150 мм друг от друга. Указанный диапазон и расстояния необходимы для получения требуемой дозы обработки картофеля и минимизации количества используемых магнитов. Диапазон варьирования индукции получен при следующих соотношениях расположения постоянных магнитов, на внешней поверхности цилиндра - 8, а на внутреннем периметре корпуса -12.

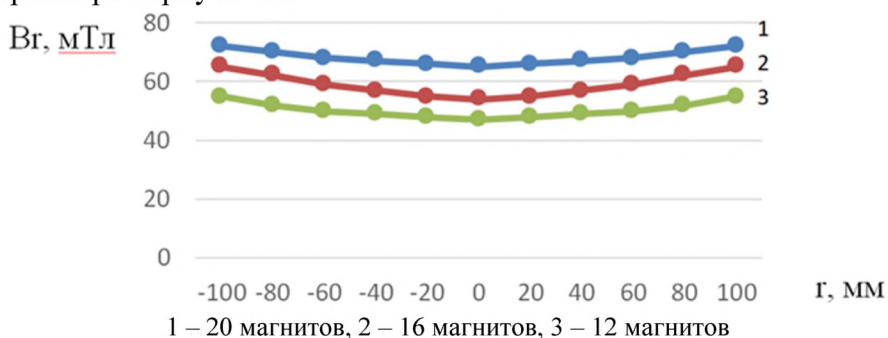


Рисунок 6 – Графическое представление значений магнитной индукции  $B_g$  между постоянными магнитами в функции их количества

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований. Программа проведения экспериментальных исследований основалась на определении значений магнитной индукции и времени нахождения клубней картофеля в рабочей емкости с использованием переменного, постоянного магнитного поля и магнитного поля, полученного от неодимовых магнитов. Кроме того, исследовались режимы работы установки при разных скоростях вращения рабочей емкости.



Для осуществления целенаправленного натурального эксперимента был выбран универсальный лабораторный стенд на кафедре "Применение электроэнергии в сельском хозяйстве" в ФГБОУ ВО "Ставропольский ГАУ".

На рисунке 7 представлены аппарат магнитной обработки вещества (АМОВ) и многофункциональный стенд для подключения к различным источникам питания.

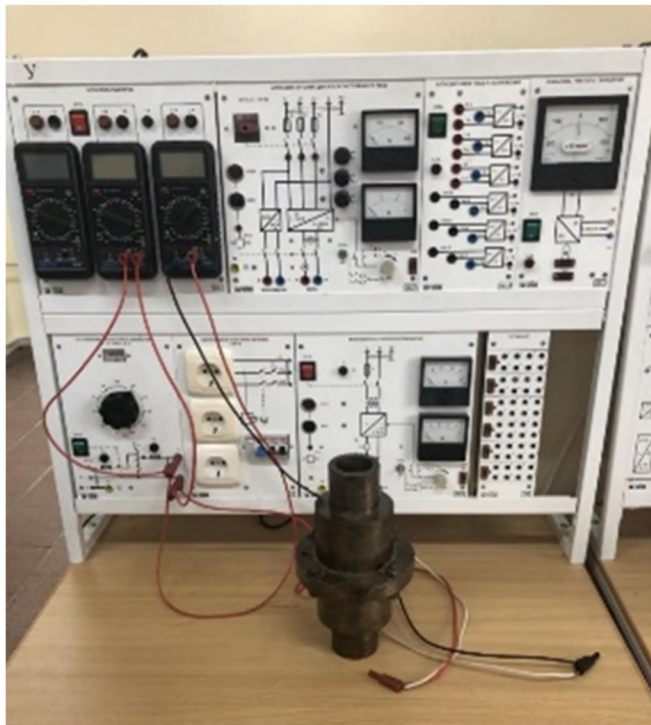
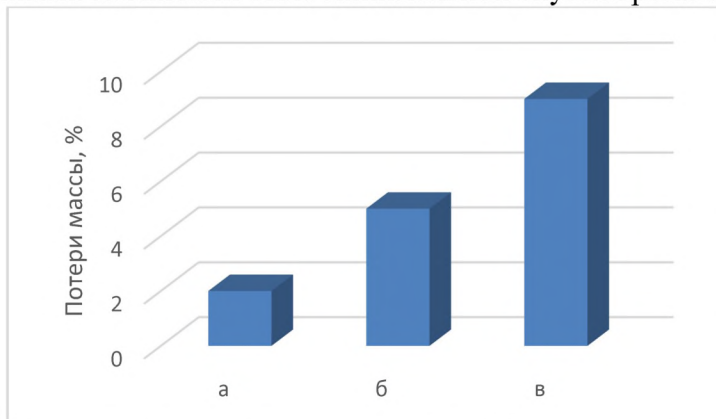


Рисунок 7 – Внешний вид экспериментальной установки с различными источниками питания

Эффективность повышенной лежкости семенного картофеля зависит от полученной дозы - произведение величины магнитной индукции на время нахождения клубней в магнитном поле. Помимо величины магнитной индукции, времени нахождения семенного картофеля в АМОВ снимались значения напряжения питания и тока, протекающего по обмотке аппарата. Основываясь на полученных экспериментальных результатах (рис.8) было

установлено, что потеря массы после обработки клубней картофеля постоянными магнитами была минимальной спустя время отлёжки.



а – постоянные неодимовые магниты, б – постоянное электромагнитное поле, в – переменное электромагнитное поле

Рисунок 8 – Потери массы семенного картофеля после обработки

В соответствии с результатами компьютерного и экспериментального моделирования была разработана магнитная установка для обработки семенного картофеля (рис. 9).

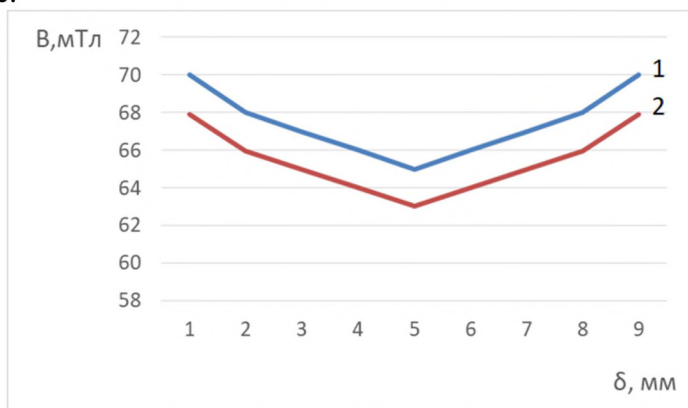


Рисунок 9 – Внешний вид экспериментальной установки с использованием постоянных магнитов

На базе установки для подтверждения теоретических расчетов были проведены экспериментальные исследования. Эмпирическим путем доказано, что для эффективной обработки семенного

картофеля достаточно, чтобы он перемешивался в рабочей емкости в течение 120 с под воздействием среднего значения магнитной индукции 65 мТл. Установлено, что при полученной дозе клубнем картофеля 7800 мТл·с достигается наилучший результат – минимальная потеря массы при длительном хранении.

На рисунке 10 представлены графики, изменения магнитной индукции в функции расстояния между постоянными магнитами, полученные по результатам математического и экспериментального моделирования. В результате проведенных исследований – нахождение значений магнитной индукции в функции расстояния между постоянными магнитами было установлено, что относительная погрешность между графиком, полученным в результате математического моделирования и графической зависимостью, построенной по данным эмпирического исследования, не превышает 3%, что говорит о приемлемости выведенных уравнений для инженерных расчетов установки магнитной обработки семенного картофеля перед закладкой на хранение.

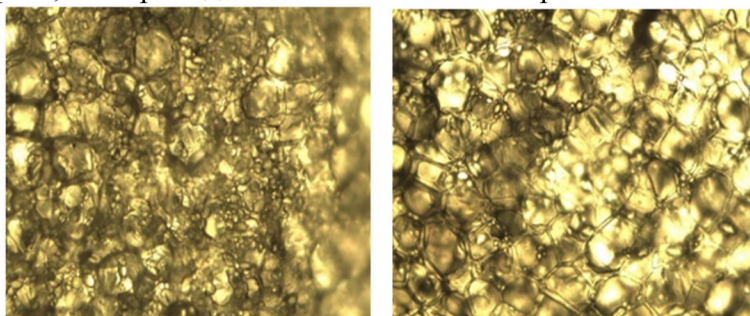


1 – расчетная кривая; 2 – кривая, полученная в результате экспериментальных исследований

Рисунок 10 – Графики изменения магнитной индукции в функции расстояния между магнитами

В результате проведенных экспериментальных исследований с использованием микроскопа (рис.11) было установлено, что после магнитной обработки в клубнях семенного картофеля происходит

трансформация, которая выражается в видоизменении структуры внешнего вида частиц крахмала и изменении физико-химических свойств воды – снижается испарение воды, которая присутствует в картофеле, что приводит к минимальной потере массы.



а - необработанный контроль; б – клубень, с минимальными потерями массы, обработанный магнитными полями на постоянных магнитах

Рисунок 11 - Внутренняя структура частиц крахмала в картофеле

**В четвертой главе** произведен расчет экономической эффективности внедрения магнитной установки для обработки семенного картофеля в крестьянско-фермерском хозяйстве. Расчет экономической эффективности проведен для фермерского хозяйства вместимостью хранилища в 50 тонн. Расчеты проводились для двух вариантов: экономия при уменьшении потерь картофеля при хранении; получение дополнительного дохода в результате повышения качества хранимого картофеля и его продажи на экспорт по более высоким ценам. Чистый дисконтированный доход за 5 лет для первого варианта составил 4148,1 тыс. руб., срок окупаемости 3,8 года. Для второго варианта чистый дисконтированный доход составил 41036,7 тыс. руб., срок окупаемости 0,1 года.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Итоги выполненного исследования**

1. Проанализированы способы хранения семенного картофеля и разновидности установок магнитной обработки различных веществ. Установлено, что сокращение потерь клубней семенного

картофеля можно решить комплексным методом используя организационные, технические и агрохимические мероприятия, а также с помощью установок созданных на основе физико-технических методов.

2. Разработана магнитная установка на постоянных магнитах, с минимальным потреблением электроэнергии, и возможностью вращения рабочего барабана с помощью регулируемого асинхронного электропривода. Основным элементом установки является рабочая емкость, на внешней поверхности внутреннего цилиндра расположено 8, а по внутреннему периметру корпуса 12 постоянных неодимовых магнитов прямоугольной формы.

3. Предложена инженерная методика расчета магнитной индукции в рабочем зазоре методом цепей, которая позволяет представить магнитные потоки в виде объемных фигур, а рабочее пространство между источниками МДС, как магнитную проводимость, что дает возможность разработать схему замещения и рассчитать необходимую магнитную индукцию, требуемую для обработки картофеля в рабочей зоне. Предлагаемый математический алгоритм инженерной методики позволяет рассчитать магнитный поток внутри рабочей емкости с относительной погрешностью в 3%.

4. Произведено компьютерное моделирование установки магнитной обработки картофеля, для получения визуализации распределения магнитных силовых линий в рабочей зоне секции, расчета количества постоянных магнитов внутри рабочей емкости, определения минимального расстояния между ними и значений магнитной индукции. В результате компьютерного моделирования с помощью пакета программы ELCUT было установлено рациональное расстояние между постоянными магнитами 100-150 мм.

5. Изготовлен опытный образец магнитной установки обработки семенного картофеля, на базе которого для подтверждения теоретических расчетов были проведены экспериментальные исследования. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало, что магнитная индукция в средней части рабочей емкости составляет 65 мТл.

6. Экспериментальные исследования обработки картофеля переменным, постоянным электромагнитным полем и полем, созданным неодимовыми магнитами, показали, что обработка семян полем, образованным от прямоугольных магнитов, на 30% увеличивает сохранность массы клубней при хранении.

7. Расчет экономической эффективности для фермерского хозяйства, вместимостью хранилища в 50 тонн, произведен для двух вариантов. Первый вариант - экономия средств при уменьшении потерь семенного картофеля при хранении. Вторым вариантом - получение дополнительного дохода в результате повышения качества хранимого картофеля и его продажи на экспорт по более высоким ценам. ЧДД за 5 лет для первого варианта составил 4148,1 тыс. руб., срок окупаемости 3,8 года. Для второго варианта ЧДД составил 437,617 млн. руб, срок окупаемости 0,1 года.

### **Рекомендации производству**

При изготовлении магнитной установки для обработки семенного картофеля рекомендуется в качестве материалов применять постоянные неодимовые магниты класса n35, а для рабочей емкости использовать немагнитные материалы. При эксплуатации установки периодически необходимо проводить мониторинг параметров, получаемых в ходе обработки. Установка рекомендуется как альтернативное техническое устройство обработки семенного картофеля перед закладкой на хранение с целью увеличения сроков лежкости клубней. Обработку необходимо проводить непосредственно перед самой закладкой на хранение. Для равномерной обработки магнитным полем клубней картофеля рекомендуется вращать рабочую емкость под углом  $45^{\circ}$ .

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Используя теоретические и экспериментальные данные, полученные в ходе проведения научных исследований можно разработать линейный ряд установок на различную производительность.

Для повышения эффективности магнитной обработки картофеля и снижения себестоимости рекомендуется создать

комбинированную установку с использованием магнитного поля, полученного от постоянных магнитов и поля, созданного от намагничивающих катушек. Результаты полученных научных исследований могут быть распространены на другие овощные и плодовые культуры, при установлении необходимой дозы обработки.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ**

*- в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science*

1. Tarasov Y. Effect of magnetic field of neodymium (NdFeB) magnet on storage quality of potatoes / Tarasov Y., Lysakov A. // Engineering for Rural Development. 2019. 18. pp. 607-612.
2. Tarasov Y. Magnetic treatment of liquid for potato loss reduction at storage/ Tarasov Y., Lysakov A.A., Nikitenko G.V., Kryukov A. // Сеп. "20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, ERD 2021 - Proceedings" 2021. С. 623-627.
3. Tarasov Y. Study of effect of negative air ions on potato loss reduction in long term storage / Tarasov, Y., Lysakov, A., Nikitenko, G., Devederkin, I. // Engineering for Rural Development, 2020, 19, стр. 1147–1151
4. Tarasov, Y. Advanced methods of potato loss reduction in storage / Lysakov, A., Nikitenko, G., Konoplev, E., Tarasov, Y. // Engineering for Rural Development, 2018, 17, стр. 560–565

*- в изданиях, рекомендованных ВАК:*

5. Тарасов Я. А. Электрофизические способы обработки картофеля при хранении / Г.В. Никитенко, А.А. Лысаков, В.Н. Авдеева, А.Г. Молчанов, Я.А. Тарасов // Сельский механизатор. - 2019. - № 12. - С. 28- 29.
6. Тарасов Я. А. Влияние поля постоянного магнита на сохранность картофеля / Г.В. Никитенко, А.А. Лысаков, Я.А. Тарасов // Сельский механизатор. - 2019. - № 4. - С. 18-19.
7. Тарасов Я. А. Устройство для обработки картофеля на основе постоянных магнитов/ Никитенко Г.В., Лысаков А.А., Тарасов Я.А.// Сельский механизатор. 2019. № 11. С. 18-19.
8. Тарасов Я. А. Моделирование аппарата электромагнитной обработки / Г.В. Никитенко, А.А. Лысаков, С.Н. Антонов, Е.В.

Коноплев, Я.А. Тарасов // Сельский механизатор. - 2018. - № 4. - С. 12.

*- в прочих изданиях:*

9. Патент на изобретение 2676136 Российская Федерация, МПК А01F25/00. Устройство магнитной обработки клубней картофеля перед закладкой на хранение / Никитенко Г.В., Лысаков А.А., Коноплев Е.В., Тарасов Я.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ставропольский государственный аграрный университет" - Заявка № 2018111033 от 27.03.2018. опубл. 27.12.2018; Бюл. № 36.
10. Патент на изобретение 2716110 Российская Федерация, МПК А01F 25/00; А23L 3/32. Устройство магнитной обработки клубней картофеля емкостного типа /Никитенко Г.В., Лысаков А.А., Коноплев Е.В., Тарасов Я.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ставропольский государственный аграрный университет" – Заявка № 2019113262 от 29.04.2019. опубл. 05.03.2020; Бюл. № 7.
11. Тарасов Я.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров установки для уменьшения потерь картофеля при хранении в условиях фермерского хозяйства/ Никитенко Г.В., Тарасов Я.А. // В сборнике: Инженерное обеспечение инновационного развития агропромышленного комплекса России. Сборник научных трудов VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения Х.Г. Урусмамбетова. Нальчик - 2018. С. 166-168.
12. Тарасов Я.А. Результаты исследования влияния поля постоянного магнита на сохранность картофеля / Никитенко Г.В., Лысаков А.А., Тарасов Я.А. // В сборнике: Цифровые технологии в сельском хозяйстве: текущее состояние и перспективы развития. Сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции. Ставрополь - 2018. С. 265-271.
13. Тарасов Я.А. Исследование электрофизических способов снижения потерь картофеля при хранении / Никитенко Г.В., Лысаков А.А., Тарасов Я.А. // В сборнике: Новые технологии в



сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона. Материалы XII Международной научно-практической конференции. Ставрополь - 2018. С. 54-64.