

*На правах рукописи*

Страхов Владимир Юрьевич

УСТРОЙСТВО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ  
ЗЕРНА ПЕРЕД ПРОРАЩИВАНИЕМ НА ВИТАМИННЫЙ КОРМ

Специальность: 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и  
энергоснабжение агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва - 2024

Работа выполнена на кафедре автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель: **Сторчевой Владимир Федорович,**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Кондратьева Надежда Петровна,**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированного электропривода ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет»

**Ракутько Сергей Анатольевич,**  
доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»

Защита состоится «23» мая 2024 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 35.2.030.03  
к.т.н., доцент

Н. Н. Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Эффективность отрасли животноводства зависит от прочной кормовой базы. Разнообразие и качество кормов в сельскохозяйственном производстве определяет состояние здоровья, высокую и устойчивую продуктивность животных.

Одним из путей повышения витаминной ценности кормов и восполнения питательных веществ в животноводстве является применение витаминных добавок. Витаминные добавки могут синтезироваться искусственным путём и поступать на предприятия в виде премиксов или иметь биологическое происхождение, например, в виде пророщенного зерна.

На сельскохозяйственных предприятиях пророщенное зерно добавляют в корма КРС, овец, свиней и птиц. Специалисты отмечают высокую биологическую ценность такой натуральной добавки, сравнительно низкую цену и возможность круглогодичного получения витаминных кормов непосредственно на предприятиях.

В технологии получения пророщенного зерна используют пшеницу, ячмень и сою. Перед проращиванием с целью обеззараживания, увеличения выхода массы корма и снижения затрат на производство, сырье подвергают различным видам обработки. На данном этапе для обеззараживания зерна производители применяют химические препараты. Методы обработки, основанные на применении химических препаратов, не могут полностью удовлетворять аграриев, поскольку небезопасны в экологическом отношении и способны привести к нежелательным физико-химическим изменениям в биологических объектах.

Для обработки зерна перед проращиванием перспективно применение энергии ультрафиолетового излучения. Бактерицидное ультрафиолетовое излучение способно уничтожить патогенные микроорганизмы на поверхности зерна и приводить к положительным биохимическим изменениям в клетках.

Таким образом, научные исследования, направленные на разработку устройств для обработки зерна перед проращиванием на витаминный корм, обеспечивающих снижение применения химических препаратов, являются актуальной народно-хозяйственной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в изучение влияния ультрафиолетового излучения на зерно, семена, развитие растений, проектирование и эксплуатацию устройств для ультрафиолетовой обработки внесли Дубров А.П., Овчукова С.А., Кондратьева Н.П., Ракутько С.А., Большин Р.Г., Юферев Л.Ю., Гурьянов Д.В., Владыкин И.Р., Краснолуцкая М.Г., Савельев В.А., Рогожин В.В., Пономарева Н.Е., Загоскина Н.В., Газалов В.С., Колесова Т.К., Гончарова Л.И., Сторожев П.И., Жилинских Ю.М., Кумин В.Д., Козинский В.А., Лазарев Д.Н., Белинский В.А., Шевель С.С., Курочкина О.А., Singh B.N., Kapoor C.P., Choudhar R.S., McCree R., Fischer M., Bonnet J., Harris P., Steffen H., Rice R.G., Green A.E., Cross K.K. и др.

**Цель работы** – разработка устройства для ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием на витаминный корм.

**Объект исследования.** Процесс ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием на витаминный корм, реализуемый под воздействием энергии ультрафиолетового излучения.

**Предмет исследования.** Технические решения и методики, направленные на снижение энергетических и материальных затрат в установках ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием на витаминный корм.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ существующих способов и технических средств для ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием на витаминный корм.

2. Разработать конструкцию установки для обработки зерна перед проращиванием на витаминный корм с использованием ультрафиолетового излучения, обеспечивающую равномерность обработки слоя зерна и поточность процесса обработки.

3. Разработать математическую модель и провести теоретические исследования распределения энергетической освещённости на облучаемой поверхности от линейного источника облучения.

4. Провести экспериментальные исследования по влиянию конструктивных параметров источника ультрафиолетового излучения на энергетическую освещённость облучаемой поверхности и влиянию режимов работы установки на эффективность ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием на витаминный корм для оптимизации режимов и снижения энергетических и материальных затрат.

5. Провести технико-экономическую оценку эффективности применения установки ультрафиолетовой обработки зерна.

**Научная новизна:**

1. Разработана математическая модель расчёта энергетической освещённости на облучаемой поверхности от линейного источника излучения.

2. Получены регрессионные зависимости, учитывающие влияние режимов ультрафиолетовой обработки на массу витаминного корма, длину ростков при проращивании, всхожесть и общую микробную обсеменённость на поверхности зерна.

**Теоретическая и практическая значимость работы** определена следующими основными результатами:

1. Разработана математическая модель, позволяющая оценить распределение энергетической освещённости от линейного источника облучения на облучаемой поверхности.

2. Обоснованы режимы ультрафиолетового облучения зерна, обеспечивающие увеличение массы, длины ростка при проращивании, повышение всхожести и энергии прорастания, снижение общего числа микробных клеток и числа дрожжей и плесени в сумме на поверхности зерна.

3. Предложена новая конструкция установки ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием на витаминный корм.

4. Научные и практические результаты диссертационных исследований прошли производственные испытания и применяются для получения

пророщенного зерна в Крестьянском (фермерском) хозяйстве «Кутовой О.А.» Ровеньского района Белгородской области.

**Методы исследования.** Исследования проводились с использованием фундаментальных законов физики, оптики, математических методов анализа, теории планирования эксперимента и математической статистики, а также с использованием пакетов прикладных программ для ЭВМ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная математическая модель распределения ультрафиолетового излучения от линейного источника на облучаемой поверхности, позволяющая оценить распределение энергетической освещённости в зависимости от удельной мощности, высоты подвеса и длины линейного источника облучения.

2. Предложенные режимы ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием на витаминный корм, обеспечивающие повышение массы витаминного корма на 11,6 %, длины ростка на 5,6%, увеличение всхожести на 39%, энергии прорастания на 38%, снижение микробной обсеменённости на 98,8% и числа дрожжей и плесени в сумме на поверхности зерна на 45,4%.

3. Разработанная, изготовленная и запатентованная конструкция установки для ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием.

**Степень достоверности.** Достоверность основных положений и выводов подтверждена результатами экспериментальных исследований процесса ультрафиолетовой обработки зерна, использованием стандартных методик, средств измерения, проведением лабораторных исследований в соответствии с ГОСТ, проведением вычислений с использованием программ для ЭВМ, совпадением теоретических и экспериментальных данных исследования.

**Апробация работы.** Материалы диссертационных исследований обсуждались на конференциях: «Роль науки и технологий в обеспечении устойчивого развития АПК России» ФГБОУ ВО РГАТУ П.А. Костычева, 2018 г.; международной конференции «Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018 г.; VI Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Студенчество России: век XXI», ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2019 г.; II и III этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Минсельхоза России ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2019 г. и ФГБОУ ВО РГАТУ им. П.А. Костычева, 2019 г.; финале программы «УМНИК», г. Белгород, 2020 г. (Диплом победителя); XXIII Всероссийской агропромышленной выставке «Золотая осень», г. Москва, 2021 г. (Серебряная медаль); III этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных высших учебных заведений Минсельхоза России ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 2021 г. (Диплом II степени); Международной научно-практической конференции «Энергосбережение АПК» ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва, 2022 г.; II и III этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных высших учебных

заведений Минсельхоза России РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023 г. (Диплом I степени), Ставропольский государственный аграрный университет 2023 г. (Диплом I степени).

**Публикации научных работ.** По теме диссертационного исследования опубликована 31 научная работа, 12 из которых опубликованы в изданиях, включённых в перечень ВАК РФ, 1 работа включена в научную базу Scopus, получено 2 патента РФ на изобретения, 3 патента на полезную модель и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объём работы.** Диссертация изложена на 178 страницах, состоит из введения, основной части, содержащей 41 рисунок, 28 таблиц, заключения, принятых сокращений, списка литературы, включающего 118 наименований, в том числе 15 на иностранном языке и 4 приложений.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** содержится общая характеристика работы, представлена актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи научного исследования, отражена научная новизна работы, а также достоверность результатов и их практическая значимость.

**В первой главе** проведён анализ существующих способов обработки зерна, исследованы особенности влияния физической, электрофизической и химической обработки на повышение всхожести, энергии прорастания и стимуляцию ростковых процессов в зерне. В результате анализа отмечается, что использование ультрафиолетовой обработки является одним из наиболее энергоэффективных и перспективных методов. Ультрафиолетовое излучение имеет ряд преимуществ: низкое энергопотребление, возможность автоматизации управления процессом, технологичность, внедрение в существующие технологические процессы без существенного переоборудования, отсутствие влияния на вкус и запах продукта после обработки, высокий бактерицидный эффект.

По результатам анализа существующих конструкций устройств ультрафиолетовой обработки зерна было отмечено наличие общих недостатков: низкая производительность, низкая равномерность облучения, сложная конструкция, отсутствие возможности управления режимами обработки.

**Во второй главе** на основании анализа технических средств ультрафиолетовой обработки зерна была принята теоретическая модель, в которой для ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием применяется конструктивная схема установки ленточного типа с линейным источником облучения. Для данной схемы разработана математическая модель оценки энергетической освещённости облучаемой поверхности и распределения потока излучения от линейного источника. Расчётная схема для физической и математической постановки задачи о распределении энергетической освещённости в пространстве от линейного источника приведена на рисунке 1.

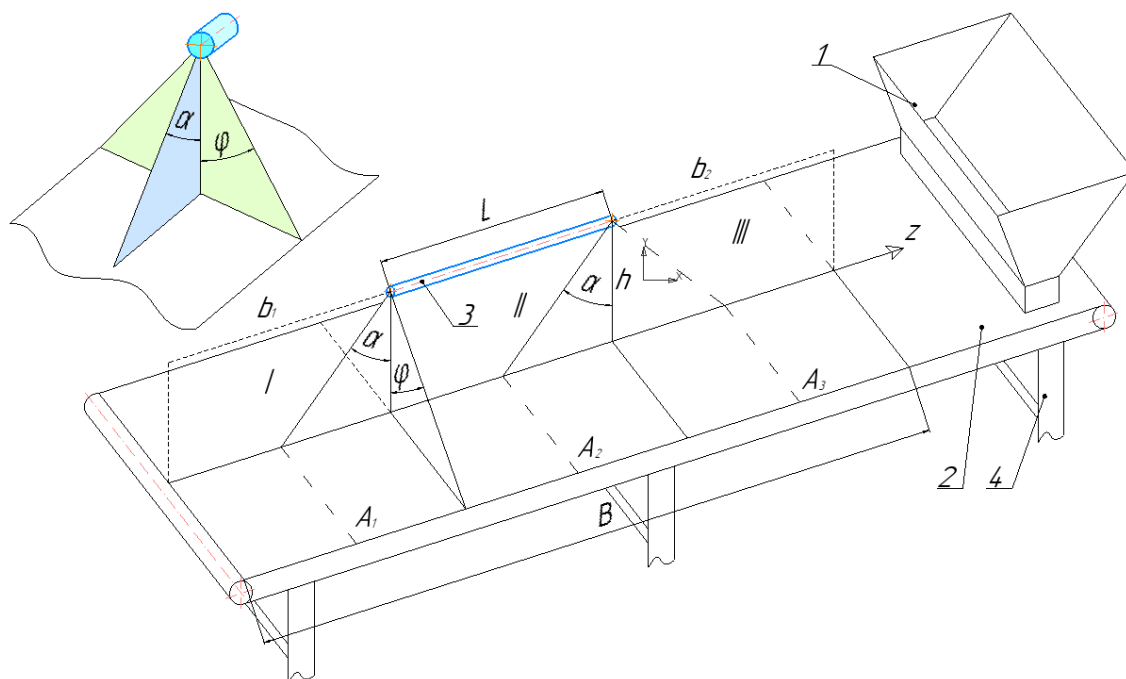


Рисунок 1 – Расчётная схема распределения энергетической освещённости в пространстве от линейного источника излучения

1 – бункер; 2 – лента транспортёра; 3 – ультрафиолетовая лампа; 4 – рама;  
 $h$  – высота подвеса источника излучения;  $B$  – длина зоны обработки;  $I, II, III$  – участки в пределах зоны обработки;  $b_1, b_2$  – расстояния определяющие положение точки  $A$  относительно крайних точек линейного излучателя;  $A_1, A_2, A_3$  – точки принадлежащие границам участков;  $\alpha, \varphi$  – соответственно углы определяющие направление от участка линейного источника  $\Delta z$  до облучаемой точки  $A$

Пусть линейный источник излучения расположен вдоль оси  $z$ . Тогда для малого участка линейного источника  $\Delta z$  сила излучения в различных направлениях будет определяться по выражению:

$$I = I_z \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $I_z$  – сила излучения,  $\text{кд}$ .

Среднее значение силы излучения  $I_z$  на участке  $\Delta z$  линейного источника можно определить с учётом линейной плотности силы излучения источника:

$$I_z = I_0 \cdot \Delta z, \quad (2)$$

где  $I_0$  – линейная плотность силы излучения,  $\text{кд/м}$ .

Облучённость в расчётной точке  $A$ , создаваемая всей длиной источника  $L$ , может быть определена интегралом:

$$E_A(\alpha, \varphi) = \frac{I_0}{h} \cos^2 \varphi \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^2 \alpha \cdot da. \quad (3)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – пределы интегрирования определяемые углом  $\alpha$  по отношению к точке  $A$  относительно начала и конца линейного источника излучения.

Линейную плотность силы излучения источника можно определить через мощность источника излучения  $F$ , тогда с учётом (1), (2), (3) находим общее выражение облучённости в расчётной точке  $A$  создаваемой всей длиной источника:

$$E_A(\alpha, \varphi) = \frac{F \cdot \cos^2 \varphi}{4\pi hL} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha. \quad (4)$$

С учётом равенства:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\alpha). \quad (5)$$

Интеграл в выражении (4) преобразуется к виду:

$$\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{1}{2} (1 + \cos 2\alpha) \cdot d\alpha = \left[ \frac{1}{2} \alpha + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right] \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2}. \quad (6)$$

Таким образом, с учётом выражений (4) и (6) получаем обобщенную формулу для расчёта облучённости в расчётной точке  $A$ , создаваемой всей длиной источника:

$$E_A(\alpha, \varphi) = \frac{F \cdot \cos^2 \varphi}{8\pi hL} \cdot F(\alpha), \quad (7)$$

$$F(\alpha) = \left[ \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right] \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2}. \quad (8)$$

$$E_A(\alpha, \varphi) = \frac{F \cdot \cos^2 \varphi}{16\pi hL} \cdot \dot{F}(\alpha). \quad (9)$$

$$\dot{F}(\alpha) = [2\alpha + \sin 2\alpha] \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2}. \quad (10)$$

Для расчёта энергетической освещённости необходимо учитывать положение расчетной точки  $A$  относительно линейного источника. При этом можно выделить 3 основных участка по координате  $z$ :

$$I) 0 \leq z \leq b_1, \quad (11)$$

$$II) b_1 \leq z \leq b_1 + L, \quad (12)$$

$$III) b_1 + L \leq z \leq b_1 + L + b_2. \quad (13)$$

В этом случае пределы интегрирования в выражениях (8) и (10) будут определяться выражениями:

$$I) \alpha_1 = \arctg \left( \frac{b_1 - z}{h} \right); \alpha_2 = \arctg \left( \frac{z - b_1}{h} \right); \quad (14)$$

$$II) \alpha_1 = \arctg \left( \frac{b_1 - z}{h} \right); \alpha_2 = \arctg \left( \frac{z - b_1 - L}{h} \right); \quad (15)$$

$$III) \alpha_1 = \arctg \left( \frac{b_1 + L - z}{h} \right); \alpha_2 = \arctg \left( \frac{z - b_1 - L}{h} \right). \quad (16)$$

Если учитывать линейную плотность и выражение (4) для расчёта облучённости в точке  $A$ , создаваемой всей длиной источника, то математическую модель можно представить в виде:

$$E_A(\alpha, \varphi) = \frac{F}{4\pi Lh} \cdot \cos^2 \varphi \cdot \frac{1}{4} [2\alpha_1 + \sin 2\alpha_1 - 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_2]. \quad (17)$$

На основе математического моделирования и численного эксперимента для ультрафиолетовой лампы типа *Uniel-ESL-PLL-36* длиной 0,4 м, мощностью 36 Вт, установленной на высоте 0,1 м над зоной облучения, была получена расчётная поверхность и номограмма для определения рабочих зон под



излучателем, обеспечивающих гарантированную энергетическую освещённость и энергетическую дозу ультрафиолетового облучения (рисунок 2).

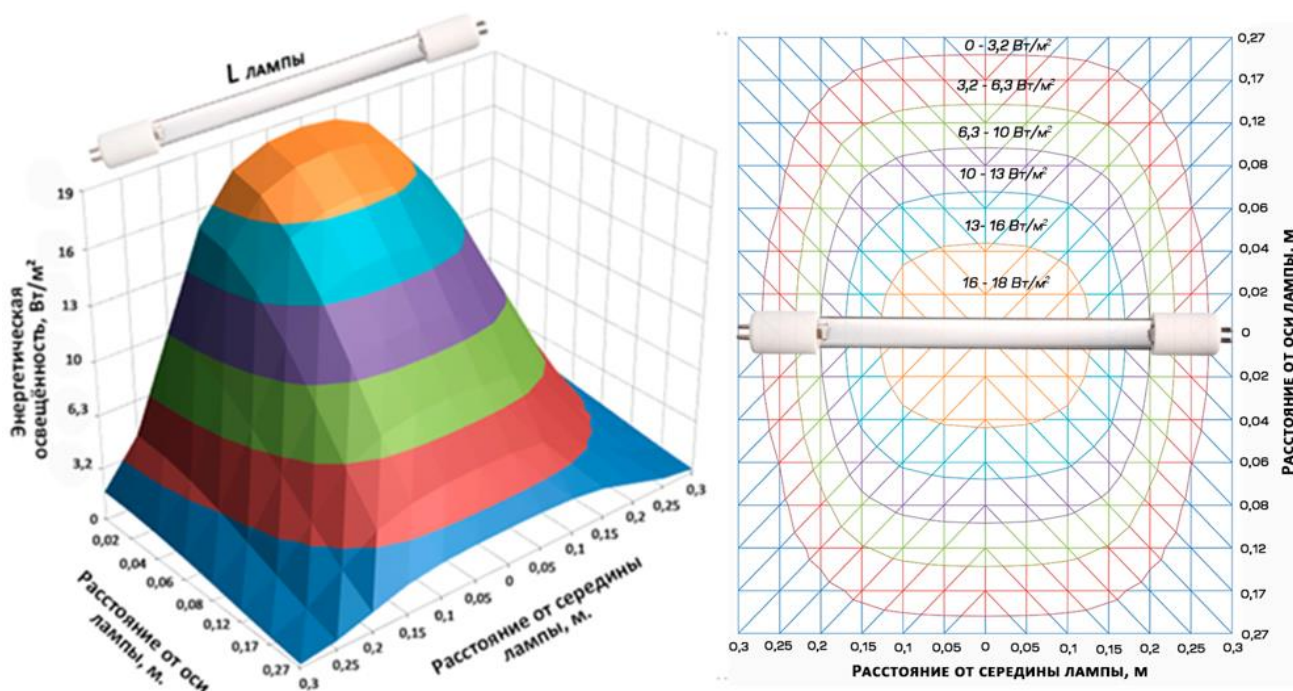


Рисунок 2 – Энергетическая освещённость, создаваемая линейным источником типа *Uniel-ESL-PLL-36*

Математическая модель (17) предполагает, что вся длина линейного источника излучения представляется в виде множества точечных источников света, размеры которых как минимум в 10 раз меньше по сравнению с расстоянием до приёмника излучения. Общий поток излучения на поверхности формируется путём интегрирования суммы излучений от множества точечных источников, с учётом мощности, высоты подвеса и длины «светящейся линии».

В светотехнике под точечным источником света понимают источник излучения совместно с отражателем. В расчётной схеме отражатель не изображен, при этом на практике он будет использован.

На номограмме можно выделить полезную ширину зоны обработки, определить взаимное расположение нескольких источников излучения с учётом обеспечения требуемой энергетической освещённости.

В результате проведённых теоретических исследований были получены рабочие формулы для расчёта и обоснования конструктивных параметров установки ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием.

**В третьей главе** разработаны методики проведения экспериментальных исследований для выявления взаимосвязей по влиянию режимов работы установки и эффективностью ультрафиолетовой обработки зерна с целью оптимизации режимов ультрафиолетовой обработки и снижения энергетических и материальных затрат. Разработанные методики базировались на основах теории планирования эксперимента и включали описание экспериментальных технических средств, целевые функции, факторы воздействия и расчёт коэффициентов регрессионных зависимостей.

Предлагаемая установка ультрафиолетовой обработки зерна представлена на рисунке 3.

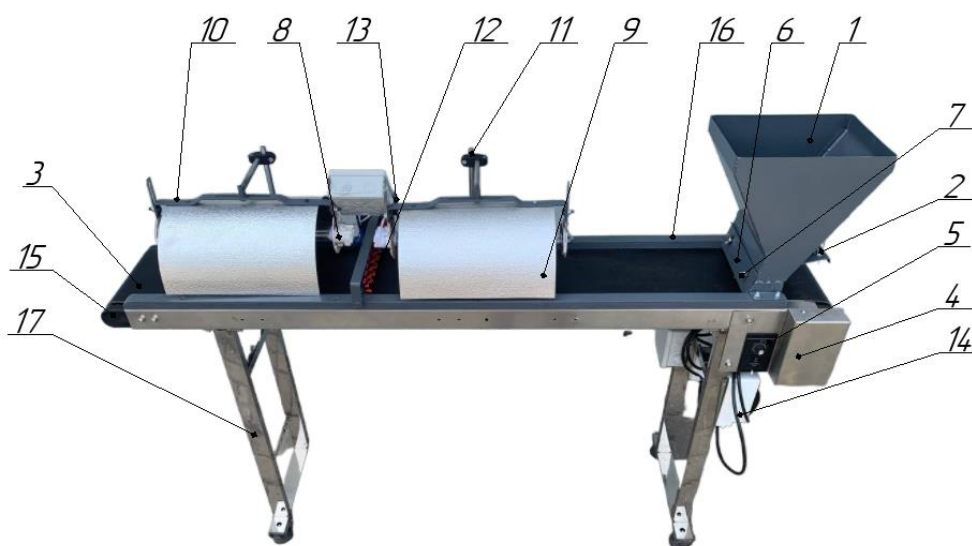


Рисунок 3 – Установка ультрафиолетовой обработки зерна

1 – бункер; 2 – заслонка; 3 – лента транспортёра; 4 – мотор-редуктор;  
 5 – преобразователь частоты; 6 – разравниватель зерна; 7 – заслонка разравнивателя;  
 8 – ультрафиолетовая лампа; 9 – параболический отражатель; 10 – подвеска для светильника;  
 11 – стойка светильника; 12 – щётка; 13 – привод щётки; 14 – блок управления щёткой;  
 15 – барабан; 16 – борт; 17 – рама

Установка включает две линейные ультрафиолетовые лампы типа *Uniel ESL-PLL-36*. Наличие двух источников излучения предусмотрено для повышения равномерности обработки. Коротковолновое ультрафиолетовое излучение не способно проникать в глубь слоя, поэтому при движении по ленте транспортёра зерно проходит обработку под первой ультрафиолетовой лампой, затем слой зерна перемешивают щёткой и обрабатывают с другой стороны под вторым источником. Технические характеристики установки представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики установки

Наименование параметра	Единицы измерения	Численные значения
Ширина ленты	мм	200
Частота вращения ленты конвейера	мин <sup>-1</sup>	0,5-10
Частота вращения щётки	мин <sup>-1</sup>	5-40
Производительность	кг/ч	83
Суммарная мощность УФ-ламп	Вт	72 (2x36)
Мощность мотор-редуктора	Вт	60
Размеры габаритные	мм	1500x250x1250
Масса	кг	46

Методика исследований предполагала замеры энергетической освещённости от источников ультрафиолетового излучения, исследования влияния ультрафиолетовой обработки на конечную массу витаминного корма после проращивания, длину ростков после проращивания, всхожесть и энергию

прораствания зерна, влияние режимов ультрафиолетовой обработки на микробную обсеменённость и число дрожжей и плесеней в сумме на поверхности зерна.

В таблице 2 представлены значения управляемых воздействующих факторов, влияющих на эффективность ультрафиолетовой обработки зерна.

Таблица 2 – Значения управляемых воздействующих факторов

Обозначение	Наименование фактора	Уровни варьирования факторов		
		-1	0	+1
$X_1$	Энергетическая освещённость поверхности при ультрафиолетовом облучении, $Вт/м^2$	1	5	9
$X_2$	Продолжительность ультрафиолетового облучения, с.	30	60	90

В четвертой главе отражены результаты экспериментальных исследований по ультрафиолетовой обработке зерна перед проращиванием. Исследования проводились по плану Коно первого и второго порядка для 2-х факторного эксперимента. В качестве объекта экспериментальных исследований использовали сою сорта «Нежеголь» с влажностью 14%.

Для оценки изменения энергетической освещённости поверхности под центром источника излучения проведены замеры УФ-радиометром «ТКА-ПКМ» (12) в спектре УФ-С. Результаты измерений для источника типа *Uniel ESL-PLL-36* и *ДКБУ-7* представлены на рисунке 4.

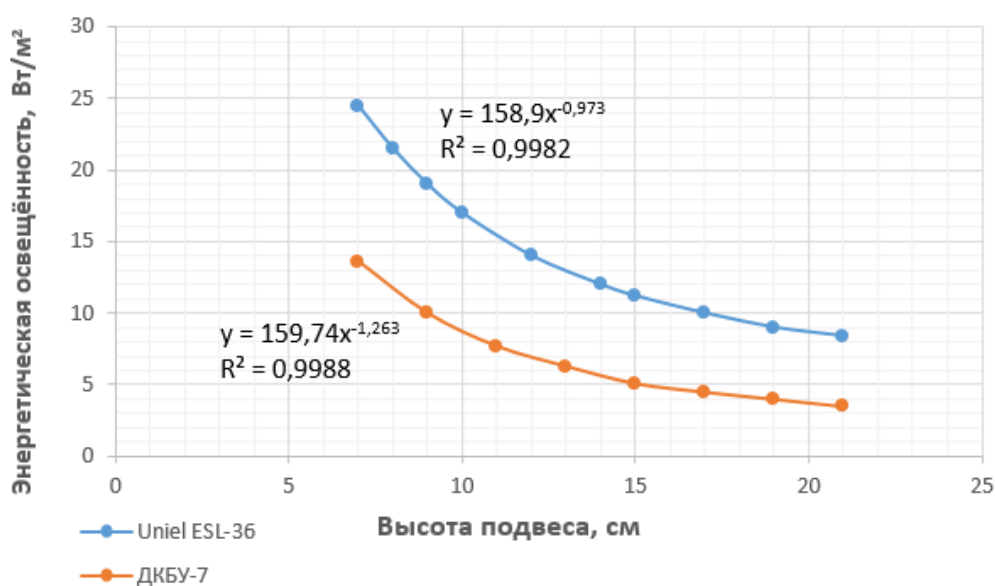


Рисунок 4 – Энергетическая освещённость поверхности

Расхождения в результатах экспериментальных и расчётных значений энергетической освещённости под центром лампы *Uniel ESL-PLL-36* с учётом высоты подвеса лампы 0,1 м не превышают 7%, что допустимо при инженерных расчётах. Совпадение результатов теоретических расчётов и практического эксперимента позволяет говорить о высокой достоверности.

Производителей пророщенного зерна интересует получение максимальной массы кормовой добавки от единицы исходного сырья. В исследованиях этот показатель принят как наиболее важный. Для определения

прироста массы зерна были проведены экспериментальные исследования по выявлению взаимосвязи между параметрами ультрафиолетовой обработки и конечной массой пророщенного зерна ( $z$ ). Уравнение регрессии, учитывающее взаимосвязь между параметрами ультрафиолетовой обработки и конечной массой пророщенного зерна  $M_{\text{зерн}}$  в натуральных значениях воздействующих факторов имеет вид:

$$M_{\text{зерн}} = 31,98 + 0,76 \cdot \frac{(E_{\text{л}} - 5)}{4} + 0,29 \cdot \frac{(t_{\text{обр}} - 60)}{30}, \quad (18)$$

где  $E_{\text{л}}$  - энергетическая освещённость поверхности,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$t_{\text{обр}}$  - продолжительность облучения, с.

Коэффициенты уравнения являются значимыми, адекватность модели удовлетворяет критерию Фишера. Для графического представления влияния режимов обработки на массу пророщенного зерна на рисунке 5 приведена расчётная поверхность массы сои ( $z$ ) в зависимости от натуральных значений энергетической освещённости поверхности ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) и продолжительности ультрафиолетового облучения (с).

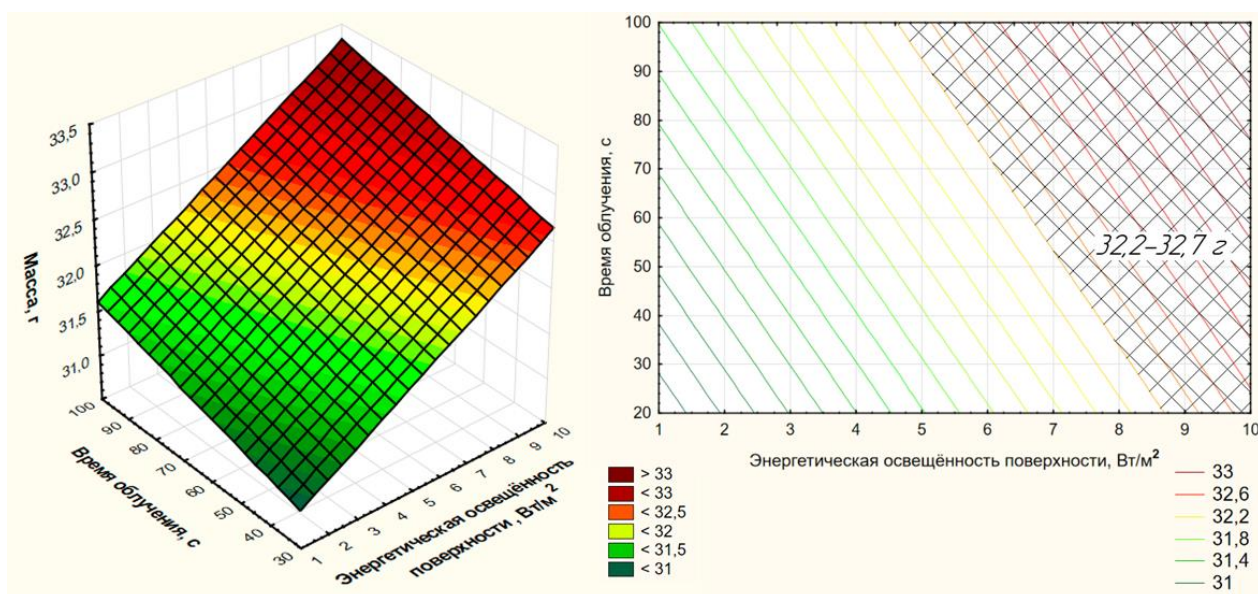


Рисунок 5 – Поверхность отклика массы сои при проращивании в зависимости от натуральных значений энергетической освещённости поверхности и продолжительности облучения

Полученные результаты свидетельствуют, что прирост массы зерна при проращивании будет зависеть как от значения энергетической освещённости поверхности, так и от времени обработки. С позиции энергозатрат целесообразно рекомендовать режим обработки зерна с энергетической освещённостью поверхности  $9 \text{ Вт}/\text{м}^2$  и наименьшей продолжительностью облучения 30 с. Затраты энергии по отношению к проценту прибавки массы зерна при этом составят  $23,3 \text{ Дж}/\%$ . Прибавка массы зерна составит  $11,6\%$  по сравнению с контролем. Дальнейшая оценка влияния ультрафиолетовой обработки на зерно при проращивании будет проведена с учётом

рекомендуемого режима для повышения массы зерна при проращивании на витаминный корм.

Оценку влияния обработки на длину ростков сои  $L_{\text{рост}}$  при проращивании проводили в соответствии с планом Коно для двухфакторного эксперимента второго порядка. На основе полученных экспериментальных данных уравнение регрессии в натуральных значениях факторов имеет вид:

$$L_{\text{рост}} = 106,81 + 3,98 \cdot \frac{(E_{\text{л}} - 5)}{4} + 9,70 \cdot \left(\frac{(E_{\text{л}} - 5)}{4}\right)^2 - 3,85 \cdot \left(\frac{(t_{\text{обр}} - 60)}{30}\right)^2, \quad (19)$$

Адекватность модели удовлетворяет критерию Фишера. Для графического представления влияния режимов обработки на длину ростков на рисунке 6 приведена расчётная поверхность длины ростков сои (мм) после пяти суток проращивания в зависимости от натуральных значений энергетической освещённости ( $Вт/м^2$ ) и продолжительности облучения ( $с$ ).

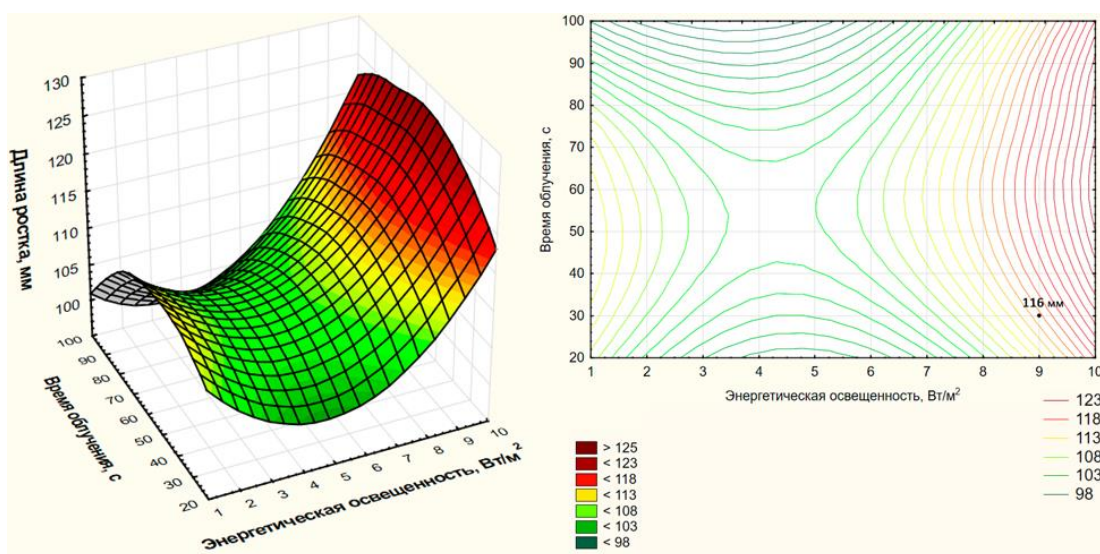


Рисунок 6 – Поверхность отклика длины ростков сои в зависимости от натуральных значений энергетической освещённости поверхности и продолжительности облучения

В рекомендованном режиме обработки длина ростков на пятые сутки проращивания составила 115,9 мм (при 109,8 мм в контрольном образце). Прирост по сравнению с контролем 5,6%. Затраты энергии по отношению к проценту прибавки длины ростков 48,2 Дж/‰.

При проращивании зерна используют сырье с низкими показателями всхожести, поэтому исследования влияния ультрафиолетовой обработки на всхожесть являются актуальными. Полученное уравнение регрессии по всхожести сои  $Y_{\text{всх}}$  в натуральных значениях факторов имеет вид:

$$Y_{\text{всх}} = 97,33 + 2,17 \cdot \frac{(E_{\text{л}} - 5)}{4} - 3,83 \cdot \frac{(t_{\text{обр}} - 60)}{30} - 3,5 \cdot \left(\frac{(t_{\text{обр}} - 60)}{30}\right)^2, \quad (20)$$

Коэффициенты уравнения являются значимыми, адекватность модели удовлетворяет критерию Фишера.

Расчётная поверхность всхожести сои в зависимости от натуральных значений энергетической освещённости ( $Вт/м^2$ ) и продолжительности облучения ( $с$ ) представлена на рисунке 7.

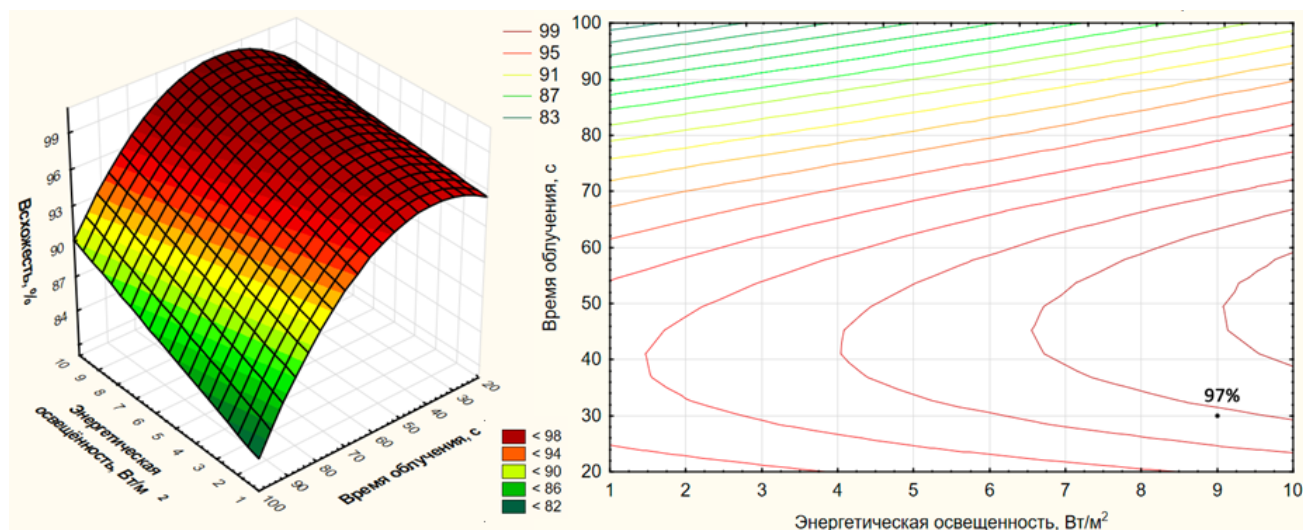


Рисунок 7 - Расчётная поверхность всхожести сои в зависимости от натуральных значений энергетической освещённости поверхности и продолжительности облучения

В опытах после ультрафиолетовой обработки зерна энергия прорастания составила 95%, что на 38% выше контрольного показателя, всхожесть 97% (при 58% в контрольном образе). Затраты энергии по отношению к проценту прибавки всхожести 6,9 Дж/%.

Для снижения числа патогенных микроорганизмов и исключения загнивания массы, зерно перед проращиванием обеззараживают. Проведённые исследования по влиянию режимов ультрафиолетовой обработки на эффективность поверхностного обеззараживания зерна позволили получить регрессионную зависимость. Уравнение регрессии в натуральных значениях факторов имеет вид:

$$Y_{\text{обез}} = 1,1 - 0,76 \cdot \frac{(E_{\text{л}} - 5)}{4} - 0,06 \cdot \frac{(E_{\text{л}} - 5)}{4} \cdot \frac{(t_{\text{обп}} - 60)}{30}, \quad (21)$$

где  $Y_{\text{обез}}$  - общее число микробных клеток на поверхности зерна,  $КОЕ/г$ .

Коэффициенты уравнения являются значимыми, адекватность модели удовлетворяет критерию Фишера. На рисунке 8 приведена расчётная поверхность общего количества микробных клеток ( $КОЕ/г$ ) на поверхности сои в зависимости от натуральных значений энергетической освещённости поверхности ( $Вт/м^2$ ) и продолжительности облучения ( $с$ ).

Согласно проекта Таможенного регламента Евразийского экономического союза «О безопасности кормов и кормовых добавок» показатель общее микробное число в кормах для свиней, КРС, овец, коз и лошадей должен быть не более  $5 \cdot 10^5$   $КОЕ/г$ .

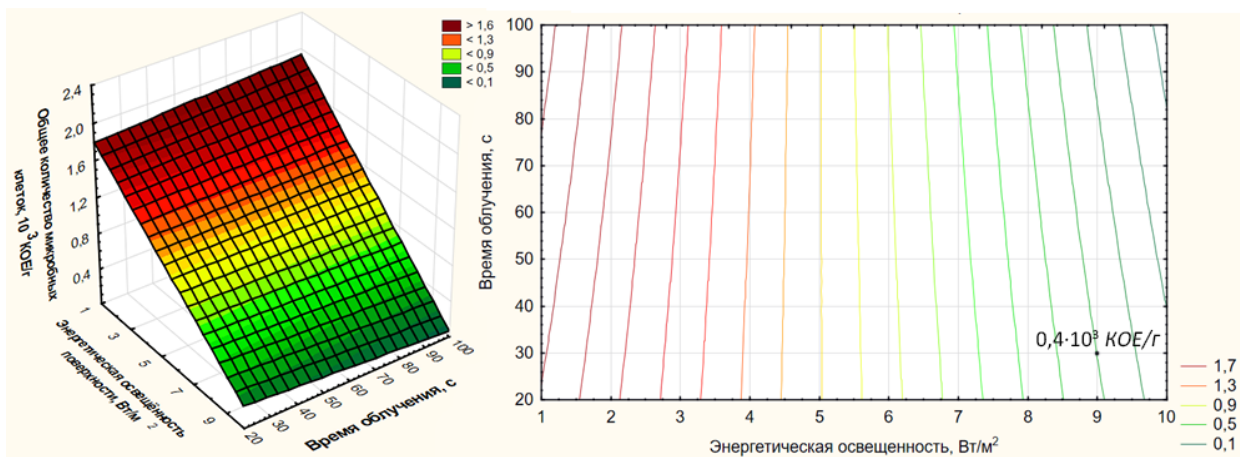


Рисунок 8 - Изменение общего числа микробных клеток на поверхности сои в зависимости от натуральных значений энергетической освещённости поверхности и продолжительности облучения

После обработки общая микробная обсеменённость на поверхности зерна зафиксирована на уровне  $0,4 \cdot 10^3 \text{ КОЕ/г}$ , что свидетельствует о снижении числа микробных клеток по сравнению с контролем на 98,8%. Затраты энергии по отношению к проценту снижения патогенных микроорганизмов  $2,7 \text{ Дж/\%}$ .

При исследовании обработанных образцов в лаборатории получены данные по влиянию режимов ультрафиолетовой обработки на число дрожжей и плесени в сумме на поверхности сои. Гистограмма снижения количества дрожжей и плесени в сумме ( $\text{КОЕ/г}$ ) на поверхности сои при различных режимах обработки представлена на рисунке 9.

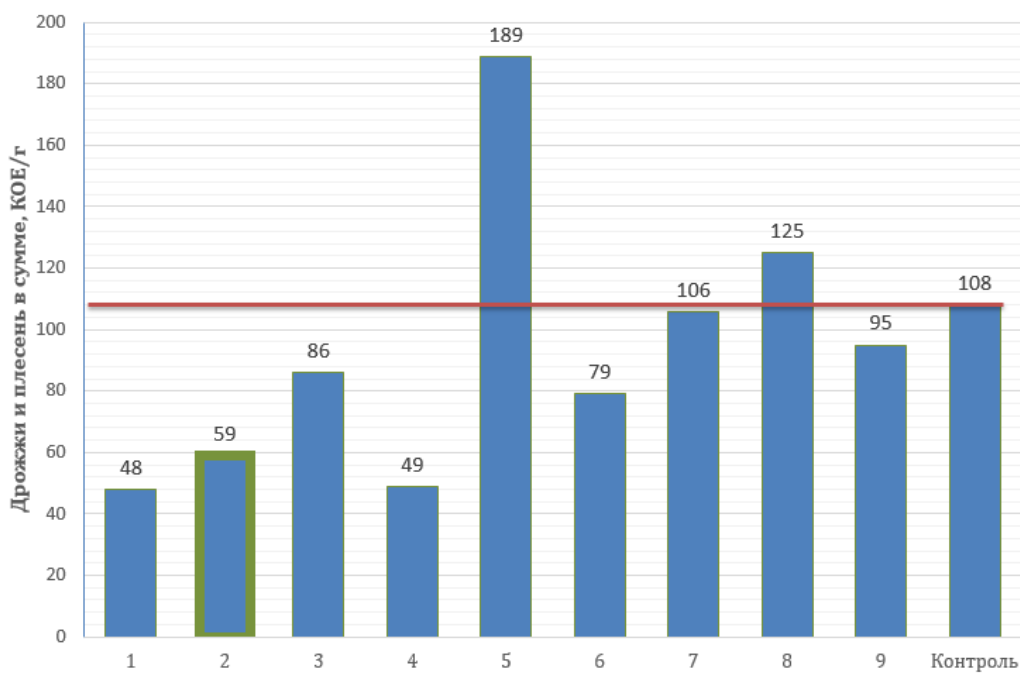


Рисунок 9 - Количество дрожжей и плесени в сумме на поверхности сои

Согласно проекту Таможенного регламента Евразийского экономического союза «О безопасности кормов и кормовых добавок»

показатель общее число грибов в кормах для свиней, КРС, овец, коз и лошадей должен быть не более  $5 \cdot 10^4$  КОЕ/г. С учётом рекомендованного режима обработки, количество дрожжей и плесени в сумме на поверхности зерна отмечено на уровне 59 КОЕ/г, что свидетельствует о снижении по сравнению с контролем на 45,4%. Затраты энергии по отношению к проценту снижения дрожжей и плесени в сумме 5,9 Дж/‰.

Результаты лабораторных исследований состава микроэлементов в сои после ультрафиолетовой обработки с энергетической освещённостью поверхности  $9 \text{ Вт/м}^2$ , продолжительностью облучения 30 с и последующего проращивания в течение пяти суток представлены на рисунке 10.

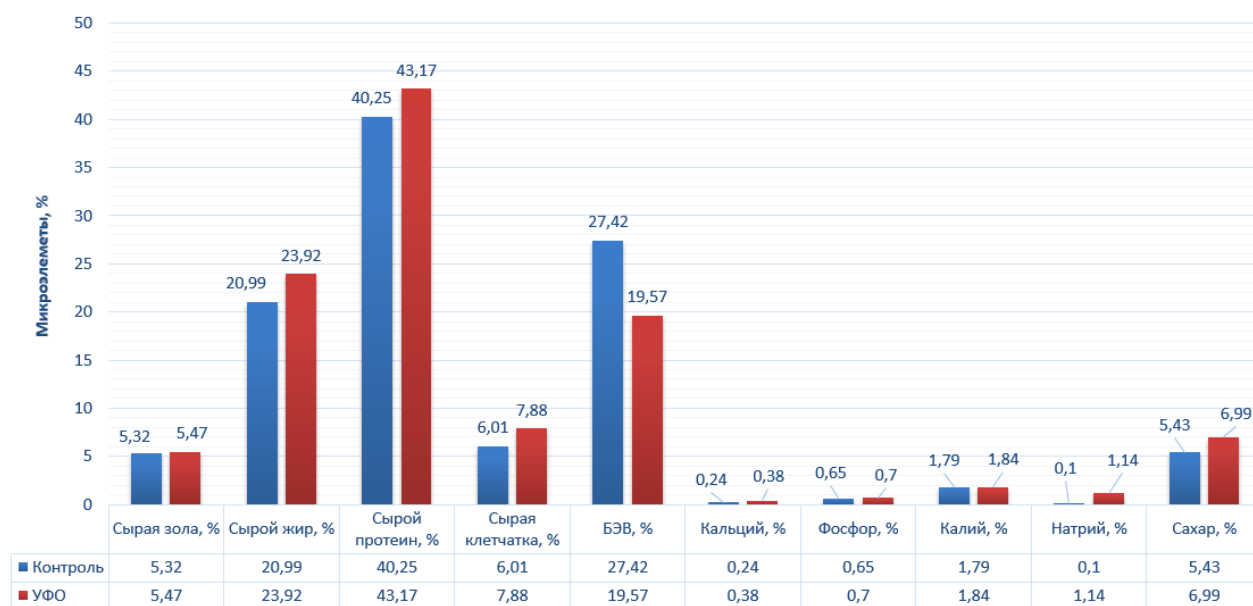


Рисунок 10 – Исследования состава микроэлементов

Результаты микробиологических исследований позволяют сделать заключение о росте числа основных микроэлементов. Прирост по отдельным категориям составил: сырая зола 0,15%, сырой жир 2,93%, сырой протеин 2,92%, сырая клетчатка 1,87%, кальций 0,14%, фосфор 0,05%, калий 0,05%, натрий 1,13%, сахар 1,56%.

В пятой главе предложена разработанная и запатентованная технологическая линия для ультрафиолетовой обработки зерна, проращивания и последующего введения в комбикорм. Проведены расчёты технико-экономической эффективности применения установки ультрафиолетовой обработки в сравнении с химическим методом обработки зерна перед проращиванием. Установлено, что при применении установки ультрафиолетовой обработки зерна с часовой производительностью 83 кг/ч (сменная производительность 0,66 т/смену) удельные эксплуатационные затраты составят 47 руб./кг. С повышением производительности установки ультрафиолетовой обработки зерна до 280 кг/ч удельные эксплуатационные



затраты снизятся до 42 руб./кг. Зависимость удельных эксплуатационных затрат от производительности установки представлена на рисунке 11.

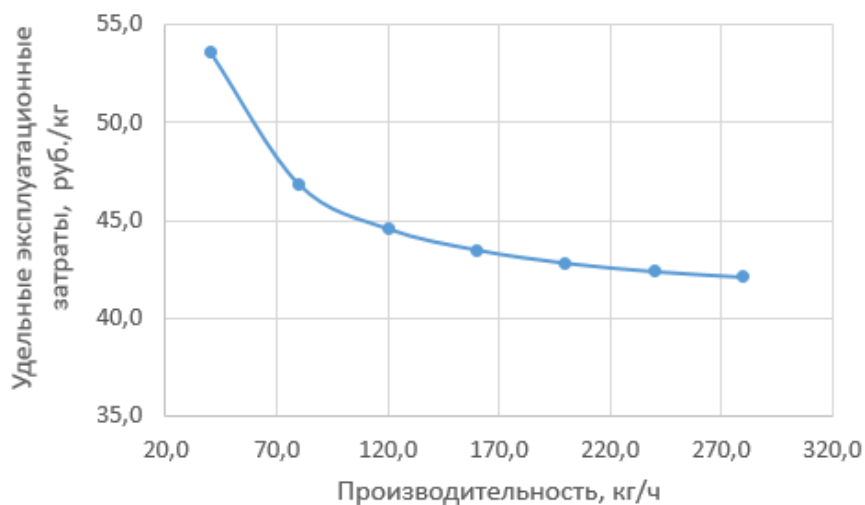


Рисунок 11 - Зависимость удельных эксплуатационных затрат от производительности установки ультрафиолетовой обработки зерна

Годовой экономический эффект в расчёте на 100 голов КРС при проращивании зерна в осенне-зимний период составит 204330 руб. Срок окупаемости предложенной установки 0,4 года.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ существующих способов обработки зерна перед проращиванием, технических средств и конструкций устройств для ультрафиолетовой обработки зерна, показал целесообразность разработки конструктивно-технологической схемы установки, обеспечивающей равномерность и поточность обработки зерна перед проращиванием на витаминный корм.

2. Разработанная конструкция включает ленточный транспортёр с двумя линейными источниками ультрафиолетового облучения и отражателями, щётку для перемешивания слоя зерна, частотный преобразователь для управления скоростью ленты, накопительный бункер и раму. Производительность установки 83 кг/ч, суммарная мощность ультрафиолетовых ламп 72 Вт (2x36 Вт), масса 46 кг.

3. Разработана математическая модель для оценки распределения энергетической освещённости от линейного источника облучения на обрабатываемой поверхности. На основе численных расчётов и моделирования получена расчётная поверхность и номограмма для определения рабочих зон под излучателем, обеспечивающих гарантированную энергетическую освещённость.

4. При выборе источника ультрафиолетового излучения установлено, что не зависимо от размеров, для увеличения потока бактерицидного спектра УФ-С необходимо размещать лампу максимально близко к зоне обработки. В предложенной установке с параметрами: высота подвеса ультрафиолетовой

лампы 0,1 м, ширина зоны обработки 0,2 м, длина зоны обработки 1,2 м, источник излучения типа *Uniel ESL-PLL-36*, обеспечит энергетическую освещённость по всей ширине ленты не менее 9 Вт/м<sup>2</sup>. Расхождения в результатах экспериментальных и расчётных значений энергетической освещённости под центром лампы *Uniel ESL-PLL-36* не превышает 7%, что позволяет проводить расчеты с высокой достоверностью.

Получены регрессионные зависимости, учитывающие влияние режимов работы установки на массу пророщенного витаминного корма, длину ростков при проращивании, всхожесть и общую микробную обсеменённость на поверхности зерна. Регрессионные зависимости справедливы в диапазоне воздействующих факторов с энергетической освещённостью от 1 до 9 Вт/м<sup>2</sup> и продолжительностью обработки от 30 до 90 с.

Прибавка массы пророщенного витаминного корма определена как наиболее важный показатель, по которому выбраны рекомендуемые режимы обработки сои с энергетической освещённостью поверхности 9 Вт/м<sup>2</sup> и продолжительностью облучения 30 с. С учётом полученных регрессионных зависимостей обработка в данных режимах позволила добиться:

- прибавки массы пророщенной сои на 11,6 %, затраты энергии по отношению к проценту прибавки массы составили 23,3 Дж/%;
- увеличение длины ростков по сравнению с контролем на 5,6%. Затраты энергии по отношению к проценту прибавки длины ростка 48,2 Дж/%;
- повышение всхожести до 97% (прирост на 39%). Затраты энергии по отношению к проценту прибавки всхожести 6,9 Дж/%;
- снижение общего числа микробных клеток на поверхности зерна на 98,8% до уровня  $0,4 \cdot 10^3$  КОЕ/г. Затраты энергии по отношению к проценту снижения патогенных микроорганизмов 2,7 Дж/%.

При обработке сои в рекомендованных режимах с энергетической освещённостью поверхности 9 Вт/м<sup>2</sup> и продолжительностью облучения 30 с отмечается снижение числа дрожжей и плесени на поверхности зерна на 45,4% до уровня 59 КОЕ/г. Затраты энергии по отношению к проценту снижения дрожжей и плесени в сумме составляют 5,9 Дж/%.

Дальнейшее проращивание на витаминный корм в течение пяти суток позволило отметить прирост числа основных микроэлементов по сравнению с контролем, а именно: сырая зола 0,15%, сырой жир 2,93%, сырой протеин 2,92%, сырая клетчатка 1,87%, кальций 0,14%, фосфор 0,05%, калий 0,05%, натрий 1,13%, сахар 1,56%.

5. В разработанной установке ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием производительностью 83 кг/ч затраты на обработку зерна составят 47 руб./кг. Годовой экономический эффект при проращивании зерна в осенне-зимний период составит 204330 руб. Срок окупаемости предложенной установки 0,4 года.

**Основные положения диссертации опубликованы  
в следующих работах:**

*Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:*

1. Страхов, В.Ю. Исследование влияния режимов предпосевной ультрафиолетовой обработки на выход массы зеленого витаминного корма сои после проращивания / В.Ю. Страхов // Аграрный научный журнал. – 2024. – №2. – С. 134–139.

2. Страхов, В.Ю. Исследование влияния режимов УФ-обработки на всхожесть семян сои при проращивании на зеленый витаминный корм / В.Ю. Страхов, С.В. Вендин, А.Н. Мануйленко // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. – 2023. – №2. – С.154–161.

3. Страхов, В. Ю. Предпосевная УФ-обработка семян сои: проращивание на витаминный корм / В.Ю. Страхов, С.В. Вендин, Ю.В. Саенко // Агроинженерия. – 2023. – № 6. – С. 46–52.

4. Страхов, В.Ю. Обоснование режимов проращивания зерна на установках периодического и непрерывного действия / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, М.С. Широков, В.Ю. Страхов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2023. – № 3(78). – С. 169–177.

5. Страхов, В.Ю. Применение УФ излучения для обработки семян сои перед проращиванием / В.Ю. Страхов, С.В. Вендин // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2022. – № 3(35). – С. 82–88.

6. Страхов, В.Ю. Результаты исследований по применению ультрафиолетового излучения для поверхностного обеззараживания семян от патогенной микрофлоры / В.Ю. Страхов, С.В. Вендин // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2022. – № 4(36). – С. 64–68.

7. Страхов, В.Ю. Влияние продолжительности освещения на скорость проращивания и химический состав зерна сои и люпина / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, М.С. Широков, В.Ю. Страхов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – № 1(42). – С. 93–98.

8. Страхов, В.Ю. Экспериментальные исследования по применению ультрафиолетового излучения при предпосевной обработке семян сои для проращивания на витаминный корм / В.Ю. Страхов, С.В. Вендин, Ю.В. Саенко // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021. – № 2(30). – С. 108–115.

9. Страхов, В.Ю. Результаты экспериментальных исследований по проращиванию семян сои на витаминный корм / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, В.Ю. Страхов, М.С. Широков // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2020. – № 4. – С. 25–34.

10. Страхов, В.Ю. Конвейерная установка для проращивания зерна / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, В.Ю. Страхов, М.А. Семернина // Сельский механизатор. – 2019. – № 12. – С. 26–27.

11. Страхов, В.Ю. Исследование влияния различных способов предпосевной обработки на проращивание зерна пшеницы и ячменя / С.В.

Вендин, Ю.В. Саенко, В.Ю. Страхов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2019. – № 2(22). – С. 15–30.

12. Страхов, В.Ю. Результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности применения УФ облучения, СВЧ обработки и искусственного освещения при проращивании зерна пшеницы и ячменя на витаминный корм / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, В.Ю. Страхов // Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – № 2(46). – С. 42–50.

*Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных:*

1. Страхов, В.Ю. Results of studies on the application of UV radiation for disinfecting the surface of soybean seeds from pathogenic microflora / С.В. Вендин, В.Ю. Страхов, А.Н. Мануйленко // ВЮ Web of Conferences. – 2023. – 67. – С. 02027.

*Патенты и свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

1. Патент № 219453 U1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Устройство для ультрафиолетовой обработки семян ленточного типа : № 2023109120 : заявл. 10.04.2023 : опубл. 18.07.2023 / С.В. Вендин, В.Ю. Страхов, О.С. Кузьмина, А.М. Крючков.

2. Патент № 2787786 С1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Устройство для ультрафиолетовой обработки семян : № 2022112581 : заявл. 05.05.2022 : опубл. 12.01.2023 / С.В. Вендин, В.Ю. Страхов, Ю.В. Саенко, О.С. Кузьмина, М.С. Широков.

3. Патент № 2782612 С1 Российская Федерация, МПК А01С 1/02. Технологическая линия для проращивания зерна : № 2022100811 : заявл. 13.01.2022 : опубл. 31.10.2022 / С.В. Вендин, В.Ю. Страхов, Ю.В. Саенко, М.С. Широков.

4. Патент № 214488 U1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Устройство для ультрафиолетовой обработки семян : № 2022114478 : заявл. 27.05.2022 : опубл. 31.10.2022 / С.В. Вендин, В.Ю. Страхов, Ю.В. Саенко, О.С. Кузьмина, М.С. Широков.

5. Патент № 206252 U1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Устройство для ультрафиолетовой обработки семян : № 2021116372 : заявл. 04.06.2021 : опубл. 02.09.2021 / С.В. Вендин, В.Ю. Страхов, С.В. Килин, С.В. Соловьев, А.О. Яковлев.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663552 Российская Федерация. Размещение источника ультрафиолетового облучения в параболическом отражателе : № 2021662590 : заявл. 06.08.2021 : опубл. 18.08.2021 / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, Е.А. Мартынов, В.Ю. Страхов.