

На правах рукописи



Исаев Алексей Васильевич

**ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН РАПСА
В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

**Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском
хозяйстве**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет».

Научный руководитель

Бастрон Андрей Владимирович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Юсупов Рамазан Хабибрахманович
доктор технических наук, профессор
кафедры автоматизации и роботизации
технологических процессов имени академика
И. Ф. Бородина ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА
имени К. А. Тимирязева»

Кондратенко Екатерина Петровна
доктор сельскохозяйственных наук, профессор
кафедры технологии хранения и переработки
сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО
«Кемеровский ГСХИ»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный
аграрный университет»

Защита диссертации состоится 10 июня 2016 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038 г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел./факс 8 (3852) 36-71-29; <http://www.altstu.ru>; e-mail: ntsc@desert.secna.ru, epb_401@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» и на официальном сайте университета <http://www.altstu.ru/structure/unit/odia/scienceevent/2838/>

Автореферат разослан «25» апреля 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Куликова Лидия Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные тенденции в области обеззараживания семян перед посевом направлены на поиск новых рациональных и экологически чистых технологий. Перспективным в решении поставленной задачи является способ обработки семян в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ), он сочетает в себе электрические и тепловые процессы воздействия на семена и позволяет осуществлять их регулирование.

При разработке СВЧ-устройств, предназначенных для технологических процессов термообработки диэлектрических материалов, используются следующие свойства СВЧ-нагрева: объемный характер воздействия, избирательность нагрева и высокий коэффициент преобразования СВЧ-энергии в тепловую.

Использование ЭМП СВЧ для целей термообработки позволяет осуществить интенсивные, безотходные, энергосберегающие и экологически чистые технологии, а разработка новых моделей и методов расчета как самих СВЧ-устройств, так и технологических процессов нагрева диэлектрических материалов является актуальной задачей.

Широкое распространение сверхвысокочастотной технологии в растениеводстве сдерживается недостатком экспериментального материала по выбору оптимальных режимов, особенно по масличным культурам, в частности, по семенам рапса исследования не проводились вообще.

Основная проблема, возникающая в рабочей камере устройства для обработки семенного материала энергией ЭМП СВЧ – это неравномерность нагрева обрабатываемого материала. Причина неравномерности нагрева заключается в том, что рабочая камера СВЧ-устройства, по сути, представляет собой объемный резонатор, колебания ЭМП СВЧ в котором происходят с образованием стоячих волн. Особенностью стоячих волн является наличие пространственных максимумов и минимумов электромагнитного поля.

Одной из главных задач при обработке семян сельскохозяйственных культур в ЭМП СВЧ является обеспечение минимального градиента температур в объеме обрабатываемого материала.

Работы по оценке равномерности нагрева в СВЧ-устройствах проводились и проводятся в университетах: СГТУ, СГУ имени Н. Г. Чернышевского, РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, СТЦС, КНИТУ-КАИ, ЗАО НПЦ «Алмаз-Фазотрон», ГНУ ВИЭСХ, МИЭМ, МГАУ им. В. П. Горячкина, Красноярский ГАУ, а так же в БГСХА (республика Белоруссия).

Кроме того, научные исследования по повышению качества посевного материала с помощью воздействия на семена физическими факторами с целью снижения энергетических и материальных затрат на предпосевную обработку семян проводили такие ученые как, Басов А. М., Бородин И. Ф., Гинзбург А. С., Евреинов М. Г., Лебедев С. П., Прищеп Л. Г., Цугленок Г. И. и другие заслуженные ученые. Результаты исследований дали значительный положительный эффект.

Несмотря на большое количество работ направленных на определение степени равномерности нагрева в ЭМП СВЧ, остается полностью неизученным вопрос о распределении температурных полей в объеме семенного материала, связано это с проблемой одновременного измерения температуры во множестве точек объема.

Самым известным путем решения задачи по увеличению равномерности обработки ЭМП СВЧ является механическое перемещение обрабатываемого

материала в рабочей камере (круговое или ламинарное движение обрабатываемого материала). Кроме того, для повышения равномерности нагрева в ЭМП СВЧ применяют: усовершенствование рабочей камеры (объемного резонатора); изменение геометрии и количества излучающих щелей волновода; распределение магнетронов по рабочей камере; воздействие на обрабатываемый материал двумя близкими частотами ЭМП СВЧ, либо возмущение ЭМП (добавления диссектора в месте входа ЭМП СВЧ в рабочую камеру). Однако, указанные выше мероприятия не могут полностью устранить неравномерность нагрева семян в рабочей камере СВЧ-установки.

Решение этой проблемы позволит улучшить посевные качества обрабатываемых в ЭМП СВЧ семян рапса за счет их равномерного нагрева в рабочей камере СВЧ-установки, повысить коэффициент полезного действия СВЧ-установки, поднять на более высокий уровень показатели самих технологических процессов предпосевной обработки семян, характеризующихся экологической чистотой и отсутствием тепловой инерции.

Целью диссертационной работы является обоснование эффективных режимов предпосевной обработки семян рапса в ЭМП СВЧ, исследование температурных полей в массе семян и разработка технических средств, повышающих равномерность нагрева.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- проанализировать методы и устройства для обеззараживания и стимуляции ростовых процессов семян рапса и дать оценку равномерности нагрева семян в рабочей камере СВЧ-устройства;
- провести моделирование тепловых процессов нагрева семян рапса при обработке в ЭМП СВЧ;
- определить влияние параметров ЭМП СВЧ на посевные качества и зараженность семян рапса и исследовать распределение температурных полей при обработке в ЭМП СВЧ;
- разработать технические средства для обработки семян рапса в ЭМП СВЧ, повышающие равномерность нагрева и оценить технико-экономическую эффективность их внедрения.

Научная новизна исследований заключается:

- в разработке теоретической модели тепловых процессов нагрева семян рапса в ЭМП СВЧ;
- в определении влияния параметров ЭМП СВЧ на посевные качества и зараженность семян рапса;
- в получении адекватных уравнений регрессии, связывающих режимные параметры ЭМП СВЧ (экспозиция обработки, удельная мощность) с выходными параметрами (всхожесть, зараженность, температура нагрева);
- в обосновании рациональных режимов обеззараживания семян рапса энергией ЭМП СВЧ;
- в получении картин температурных полей в объеме семенного материала при обработке в ЭМП СВЧ;
- в оценке влияния степени равномерности нагрева ЭМП СВЧ на энергию прорастания и всхожесть семян рапса.

Теоретическая значимость работы.

Результаты исследований и разработанные технические средства для обработки семян рапса энергией СВЧ-поля создают базу для проектирования технологической

линии и изготовления производственной установки, повышающей степень равномерности нагрева семенного материала.

Практическая значимость работы:

– предложенная технология и технические средства предпосевной СВЧ-обработки семян сельскохозяйственных культур, отнесены к инновационным продуктам Красноярского ГАУ, включенным в технологическую платформу агропромышленного комплекса Красноярского края для внедрения на предприятиях АПК;

– экспериментальная установка для предпосевной обработки семян энергией ЭМП СВЧ, внедрена в ГСХУ «УЧЕБНО-ОПЫТНОЕ ХОЗЯЙСТВО МИНДЕРЛИНСКОЕ»;

– результаты исследований процесса обработки семян энергией ЭМП СВЧ внедрены в учебный процесс в рамках изучения дисциплины «Принципы инженерного творчества» по направлению 35.03.06 «Агроинженерия» (профиль «Электрооборудование и электротехнологии в АПК»).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: математическая статистика и анализ случайной величины, метод активного планирования технологического эксперимента, регрессионный анализ обработки экспериментальных результатов, методика лабораторного опыта и имитационное моделирование.

На защиту выносятся:

– теоретическая модель тепловых процессов, проходящих при обработке семян рапса в ЭМП СВЧ;

– эффективные режимы и результаты исследования влияния параметров ЭМП СВЧ на посевные качества и зараженность семян рапса;

– статистические модели, связывающие входные (экспозиция обработки, удельная мощность ЭМП СВЧ) и выходные (всхожесть, зараженность, температура семян) параметры для определения эффективных технологических режимов обработки семян рапса ЭМП СВЧ;

– зависимости, определяющие взаимосвязь распределения температурных полей в объеме семенного материала и степени равномерности нагрева ЭМП СВЧ с энергией прорастания и всхожестью семян рапса;

– требования к техническим средствам для обработки семян масличных культур ЭМП СВЧ.

Степень достоверности и апробация результатов.

Основные положения работы обсуждались и одобрены:

– на IV международной научно-практической конференции «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии», Иркутский ГАУ им. А. А. Ежевского (г. Иркутск, 2015);

– на VI международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК», Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова (г. Саратов, 2015);

– на VII международной научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные тенденции развития российской науки», КрасГАУ (г. Красноярск, 2015);

– на III этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых МСХ РФ, Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова (г. Саратов, 2013);

- на II этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых МСХ РФ (г. Красноярск, 2013);
- на II международной научно-практической конференции «Электроэнергетика в сельском хозяйстве», АлтГТУ им. И. И. Ползунова (г. Барнаул, 2011);
- на всероссийских студенческих научных конференциях «Студенческая наука – взгляд в будущее», КрасГАУ (г. Красноярск, 2008 - 2011 г.г.);
- на студенческой региональной научно-практической конференции «Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века», КрасГАУ (г. Ачинск, 2008 г.);
- на региональной научно-практической конференции «Аграрная наука на рубеже веков», КрасГАУ (г. Красноярск, 2007 г.).

Основные научные результаты, изложенные в диссертации, получены самостоятельно. По результатам исследований изготовлена и представлена в различных модификациях экспериментальная установка для обеззараживания семян энергией СВЧ-поля. В работах, выполненных в соавторстве, от 30 % до 90 % составляет вклад автора.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе пять в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов кандидатских диссертаций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Изложена на 149 страницах машинописного текста, включая приложения. Содержит 40 рисунков и 23 таблицы. Список литературы содержит 173 наименования. Четыре приложения представлены на 13 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, определены цель и задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, отражены вопросы реализации и апробации научных результатов, сформулированы основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе «Анализ методов и технических средств для обеззараживания и стимуляции роста семян рапса» описаны процессы, проходящие в семенном материале при воздействии ЭМП СВЧ, проанализированы методы и устройства для обеззараживания и стимуляции ростовых процессов семян сельскохозяйственных культур и дана оценка равномерности нагрева семян в рабочей камере СВЧ-устройства.

В диапазоне частот $10^6 \dots 10^{10}$ Гц неполярные диэлектрики, например сухое зерно, ведут себя как прозрачная среда, т.е. не поглощают энергию ЭМП СВЧ. Тангенс угла диэлектрических потерь воды в сотни раз больше, чем сухого зерна. Таким образом, энергия электромагнитного поля при обработке предварительно увлажненных семян поглощается в основном водой.

В процессе обеззараживания семян ЭМП СВЧ необходимо путем увлажнения разделить диэлектрические свойства семян и паразитирующих грибных и вирусных инфекций, находящихся на поверхности и внутренних структурах зерновки.

Поскольку вирусы, грибы, бактерии обладают большой влагопоглощательной способностью, они впитывают воду в десятки раз быстрее, чем зерно. Через 3 – 15 мин после замачивания они набухают, влажность их достигает 80 – 90 %. Семена же за этот промежуток не успевают увлажниться и остаются практически сухими. В

электромагнитном поле сверхвысокой частоты основная часть энергии поглощается вирусами, грибами, бактериями, которые в результате быстрого (10...30 с) избирательного нагрева инактивируют (гибнут). Температура семян при этом повышается незначительно. Кроме того, благодаря прогреву семян стимулируются рост и развитие растений.

Сформулировано основное техническое противоречие, которое возникает при предпосевной подготовке семян.

Проведя литературно-патентный поиск по существующим устройствам для предпосевной обработки семян энергией ЭМП СВЧ, пришли к выводу, что наименее изученными культурами на предмет обработки семян в ЭМП СВЧ являются масличные культуры, в частности семена рапса. Приведена характеристика и особенности рапса, современное состояние его возделывания в России и семенные инфекции семян.

Проведен анализ экспериментально-теоретических работ по распределению температурных полей в рабочей камере СВЧ-устройств, показывающий значительную неравномерность нагрева обрабатываемого материала.

Проанализирована степень равномерности нагрева семенного материала ЭМП СВЧ в рабочей камере СВЧ-устройств, дана методика оценки этой равномерности.

Рассмотрены существующие технические средства, повышающие равномерность обработки ЭМП СВЧ: механическое перемещение обрабатываемого материала в рабочей камере (круговое или ламинарное движение обрабатываемого материала), усовершенствование рабочей камеры (объемного резонатора), изменение геометрии и количества излучающих щелей волновода, распределение магнетронов по рабочей камере, воздействие на обрабатываемый материал двумя близкими частотами ЭМП СВЧ, возмущение ЭМП (добавления диссектора в месте входа ЭМП СВЧ в рабочую камеру).

Анализ состояния научно-технической проблемы позволил сформулировать цель и задачи для ее решения.

Во второй главе «Моделирование тепловых процессов нагрева семян рапса при обработке в ЭМП СВЧ и методика определения энергоэффективных режимов СВЧ-обработки» произведено теоретическое моделирование тепловых процессов нагрева семян рапса при обработке в ЭМП СВЧ, дана методика определения энергоэффективных режимов СВЧ-обработки и определены основные входные параметры, влияющие на тепловую обработку семян.

Компьютерное моделирование тепловых процессов нагрева семян рапса при обработке в ЭМП СВЧ проводилось в электронных таблицах Excel, с использованием методики, разработанной в Красноярском ГАУ д.т.н, профессором Г.И. Цугленок.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_{об} = Q_z + Q_э + Q_в + Q_m + Q_n, \quad (1)$$

где $Q_{об}$ – общее количество тепла, подведенное в обрабатываемую массу семян, МДж;

Q_z – количество тепла, выделяемое в зародыше, МДж;

$Q_э$ – количество тепла, выделяемое в эндосперме, МДж;

$Q_в$ – количество тепла, выделяемое в пленке воды, находящейся на поверхности семян, МДж;

Q_m – количество тепла, выделяемое в болезнетворной микрофлоре, МДж;

Q_n – потери связанные с испарением и теплопотерями семян в рабочей камере, МДж.

Удельная мощность, выделяемая электромагнитным полем в массе семян определяется по формуле:

$$P_{ydc} d\tau = Q_{об}, \quad (2)$$

$$Q_3 + Q_э = P_{ydc} d\tau, \quad (3)$$

где P_{ydc} – удельная мощность электромагнитного поля, поглощаемая массой семян, Вт/дм³;

$d\tau$ – время воздействия на семена, с.

Уравнение теплового баланса для сухого семени имеет вид:

$$P_{ydc} d\tau = c_c dt_c + a_c t_c d\tau, \quad (4)$$

где c_c – удельная теплоемкость семени, кДж/кг·°С;

a_c – удельная теплоотдача семени, кВт/м²;

t_c – температура нагрева семени, °С.

Для пленки воды соответственно:

$$Q_э = P_{ydc} d\tau, \quad (5)$$

$$P_{ydc} d\tau = C_э dt_э + a_э t_э d\tau, \quad (6)$$

где P_{ydc} – удельная мощность выделяемая в пленке воды, кВт/кг;

$d\tau$ – время нагрева, с;

$C_э$ – удельная теплоемкость пленки воды, кДж/кг;

$a_э$ – удельная теплоотдача воды, кВт/м²;

$t_э$ – температура нагрева пленки воды, °С.

Решая уравнение (4), делим обе части уравнения на произведение:

$$\frac{P_{ydc}}{C_c} = \frac{dt_c}{d\tau} + \frac{a_c}{C_c} t_c, \quad \text{или} \quad \frac{dt_c}{d\tau} = \frac{C_c}{P_{ydc} - a_c t_c}. \quad (7)$$

Проинтегрировав уравнение при $t=t_0$ и $t=t_c$ определяется температура нагрева сухой части семени:

$$t_c = \frac{P_{ydc}}{a_c} \left(1 - \ell^{\frac{\tau}{c_c/a_c}} \right) - \ell^{\frac{\tau}{c_c/a_c}} t_0. \quad (8)$$

Аналогично определяется температура нагрева пленки воды и болезнетворной микрофлоры:

$$t_э = \frac{P_{ydc}}{a_э} \left(1 - \ell^{\frac{\tau}{c_э/a_э}} \right) - \ell^{\frac{\tau}{c_э/a_э}} t_0. \quad (9)$$

$$t_{\text{м}} = \frac{P_{\text{удм}}}{a_{\text{м}}} \left(1 - \ell \frac{\tau}{c_{\text{м}}/a_{\text{м}}} \right) - \ell \frac{\tau}{c_{\text{м}}/a_{\text{м}}} t_0. \quad (10)$$

После расчета в электронных таблицах температуры получены теоретические кривые нагрева семян рапса в ЭМП СВЧ, (см. рисунок 1).

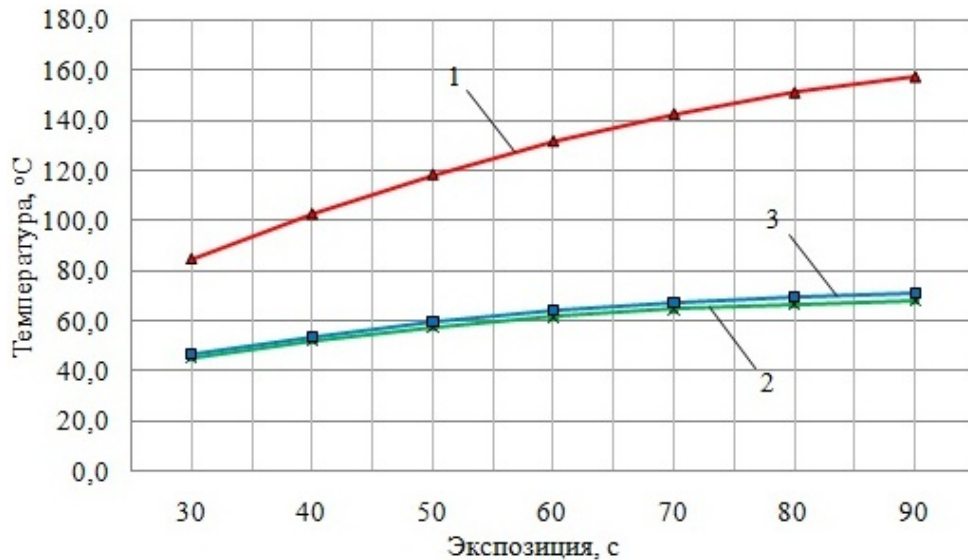


Рисунок 1 – Теоретические зависимости температуры увлажненной поверхности семян рапса (1), сухой части семени (2) и средней интегральной температуры семени (3) от времени обработки в ЭМП СВЧ, при $P_{\text{уд}} = 2548$ Вт/дм³

Аналогично были построены зависимости для удельной мощности 1528 Вт/дм³ и 509 Вт/дм³.

Многочисленными опытами, проведенными с семенами рапса в лабораторных условиях, установлено, что параметры СВЧ-обработки семян вызывают у растений не один, а комплекс эффектов. Это: гибель инфекционных заболеваний, повышение энергии прорастания, увеличение всхожести.

Для определения основного технологического эффекта при обработке семян рапса в ЭМП СВЧ и для проведения планирования эксперимента варьировались два основных входных фактора: x_1 – экспозиция, с; x_2 – удельная мощность, Вт/дм³ (см. таблицу 1). Входные параметры варьируются на трех уровнях: минимальном (-1); среднем (0); максимальном (+1).

Таблица 1 – Исходные данные для планирования эксперимента

Характеристики плана	Условные обозначения	x_1 экспозиция обработки, с	x_2 удельная мощность, $P_{\text{уд}}$, Вт/дм³
Верхний уровень	+1	90	2548
Основной уровень	0	60	1529
Нижний уровень	-1	30	509
Звездная точка	$+\lambda$	90	2548
Интервал варьирования	$-\lambda$	30	509

На основании полученных данных при моделировании тепловых процессов, протекающих в семени и для дальнейших исследований по определению рациональных режимов обработки в ЭМП СВЧ необходимо ограничить время обработки (экспозицию) $\tau = 30 \dots 90$ с, что позволит нагреть семенной материал от $26,5^\circ\text{C}$ до $72,75^\circ\text{C}$ (при частоте $f = 2450$ МГц).

Оценка степени равномерности нагрева семян в ЭМП СВЧ может производиться с помощью коэффициента вариации, который показывает меру относительного разброса случайной величины и ту долю среднего значения этой величины, которую составляет ее средний разброс.

Третья глава «Анализ влияния параметров ЭМП СВЧ на посевные качества и зараженность семян рапса и исследование температурных полей при его обработке» посвящена анализу полученных экспериментальных данных с целью определения влияния параметров ЭМП СВЧ на посевные качества и зараженность семян рапса и исследованию распределения температурных полей при их обработке в ЭМП СВЧ.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с разработанной структурной схемой обработки семян ЭМП СВЧ (см. рисунок 2)

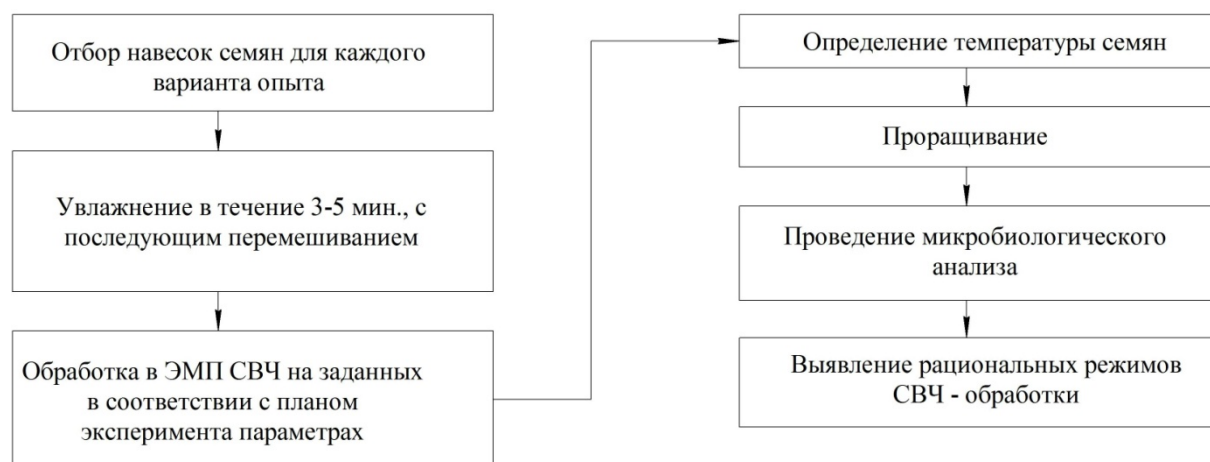


Рисунок 2 – Структурная схема обработки семян ЭМП СВЧ

Основными выходными параметрами при определении рациональных режимов в лабораторных условиях явились: температура нагрева, зараженность семян патогенной микрофлорой, лабораторная всхожесть.

Дисперсионный и регрессионный анализы дали возможность получить уравнения регрессии, описывающие процесс СВЧ-обработки, по температуре нагрева:

$$Y_1 = 44,5 + 15,67 \cdot x_1 + 8,58 \cdot x_2 + 5,37 \cdot x_1 \cdot x_2 ; \quad (11)$$

$$\text{по всхожести: } Y_2 = 89,7 - 18 \cdot x_1 - 7,25 \cdot x_2 - 19 \cdot x_1^2 - 13,37 \cdot x_1 \cdot x_2 ; \quad (12)$$

$$\text{по бактериозу: } Y_3 = 3,17 - 0,5 \cdot x_1 - 1 \cdot x_1^2 - 1,75 \cdot x_2^2 , \quad (13)$$

$$\text{по альтернариозу: } Y_4 = 1,27 - 1,25 \cdot x_1 - 1,08 \cdot x_2 + 0,88 \cdot x_1 \cdot x_2 , \quad (14)$$

$$\text{по фузариозу: } Y_5 = 6,16 - 2,5 \cdot x_1 - 1,33 \cdot x_2 - 1,5 \cdot x_1 \cdot x_2 , \quad (15)$$

$$\text{по черной ножке: } Y_6 = -0,72 - 1,16 \cdot x_1 - 1,5 \cdot x_2 + 1,33 \cdot x_1^2 + 1,33 \cdot x_2^2 + 1,75 \cdot x_1 \cdot x_2 , \quad (16)$$

где $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6$ соответственно значения: температуры нагрева $^{\circ}\text{C}$; всхожести, %; бактериоза, %; альтернариоза (*Alternaria*), %; фузариоза (*Fusarium*), %; черной ножки (*Penicillium sp*), %;

x_1 – время прохождения семян по рабочей камере (экспозиция обработки), с;

x_2 – удельная мощность, Вт/дм^3 .

Гипотеза не отвергается, уравнения регрессии признаются адекватными, если $F_{\text{табл}} \geq F_{\text{рас}}$, $Y_1 = 2,56 > 0,45$; $Y_2 = 2,71 > 1,33$; $Y_3 = 2,56 > 0,41$; $Y_4 = 2,56 > 2,30$; $Y_5 = 2,56 > 0,59$; $Y_6 = 2,56 > 1,42$.

При $P_{\text{уд}} = 509 \text{ Вт/дм}^3$ и экспозиции обработки $\tau = 90$ с температура нагрева семян достигает $31,25^{\circ}\text{C}$, (рисунок 3) энергия прорастания и лабораторная всхожесть повышается до 95,5 %. Это объясняется тем, что температура нагрева семян в данном временном диапазоне не превышает допустимых значений, тем самым стимулируя рост.

Ухудшение качественных показателей семян происходит при мощности $P_{\text{уд}} = 2548 \text{ Вт/дм}^3$ и экспозиции обработки $\tau = 90$ с, температура нагрева семян достигает $72,75^{\circ}\text{C}$, однако такой режим недопустим, так семена под действием высокой температуры гибнут.

Лабораторная всхожесть семян, обработанных в ЭМП СВЧ, изменяется аналогично энергии прорастания. Анализ уравнения по лабораторной всхожести (12) и полученные поверхности отклика (рисунок 4) показывают, что изменение лабораторной всхожести также связано с изменением двух изучаемых факторов воздействия: экспозиции обработки и удельной мощности ЭМП СВЧ.

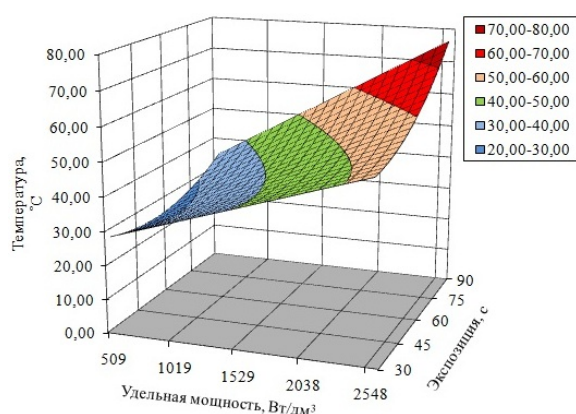


Рисунок 3 – Зависимость температуры семян от мощности и времени нагрева

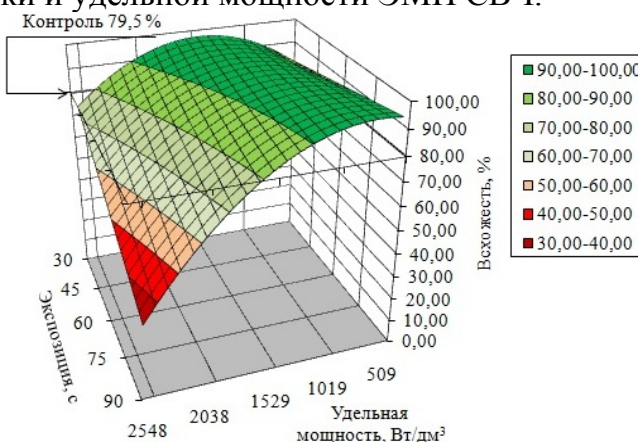


Рисунок 4 – Влияние параметров СВЧ-обработки на всхожесть

Полученная модель уравнения (11) и рисунок 3, описывающие нагрев семян рапса в ЭМП СВЧ, позволяют рассчитать и подобрать предельно допустимую температуру нагрева семян.

При максимальной мощности и длительности проведения опыта, нагрев семени достигает максимальной отметки $72,75^{\circ}\text{C}$, что отрицательно сказывается на всхожести, семена сгорают.

Полученные поверхности отклика (рисунок 5 – 8) показывают, что наиболее эффективными являются режимы при: $P_{\text{уд}} = 1529 \text{ Вт/дм}^3$ и $\tau = 60 \dots 90$ с, $P_{\text{уд}} = 2548 \text{ Вт/дм}^3$ и $\tau = 30 \dots 90$ с.

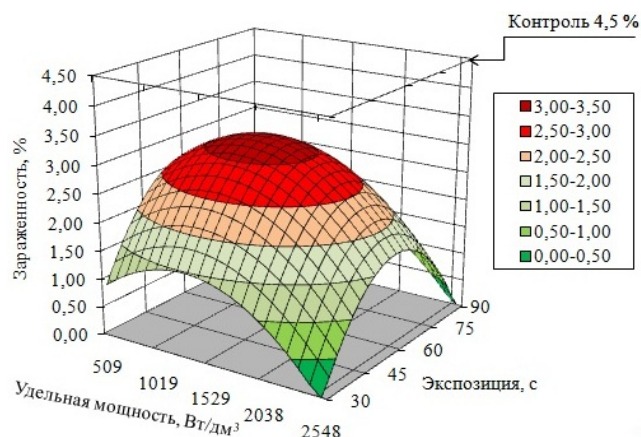


Рисунок 5 – Влияние параметров СВЧ-обработки на зараженность бактериозом

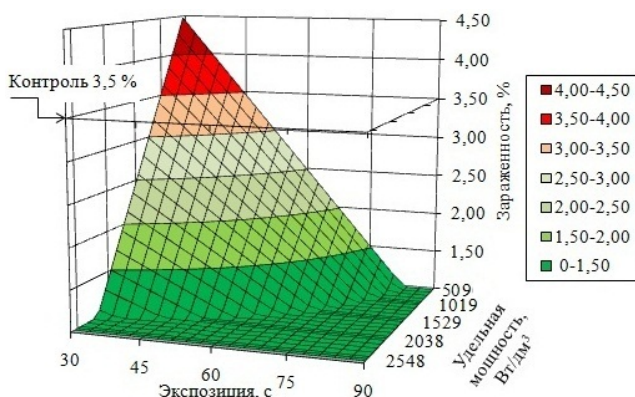


Рисунок 6 – Влияние параметров СВЧ-обработки на зараженность альтернариозом

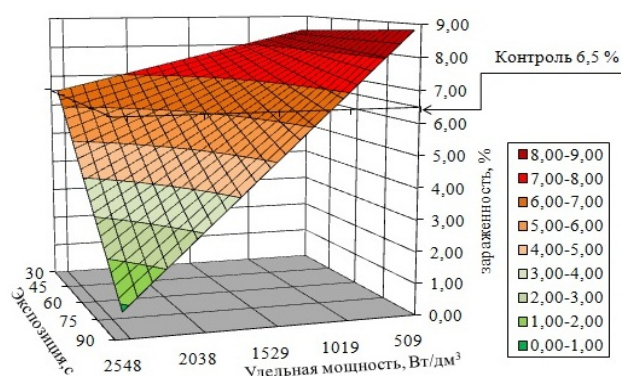


Рисунок 7 – Влияние параметров СВЧ-обработки на зараженность фузариозом

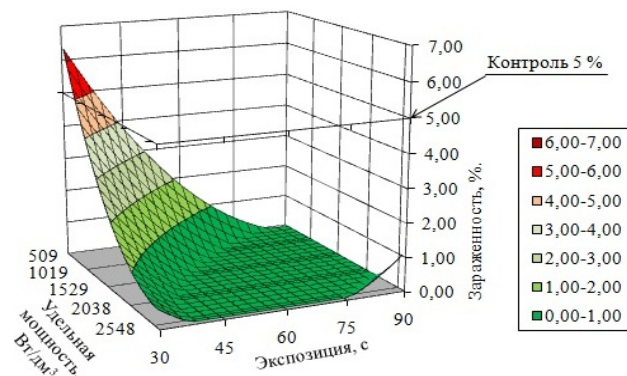


Рисунок 8 – Влияние параметров СВЧ-обработки на зараженность черной ножкой

Здесь достигается наилучший результат в плане обеззараживания семян, так на этих режимах обработки полностью снимаются такие инфекции, как *Aspergillus*'s, значительно снижается зараженность альтернариозом, фузариозом и бактериозом. Это объясняется высокой температурой нагрева семян $42,5...72,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ и продолжительной экспозицией обработки, понижение которой приводит к снижению эффекта обеззараживания. Хороший результат дает режим при $P_{уд} = 1529\text{ Вт/дм}^3$, $\tau = 60...90\text{ с}$, здесь температура нагрева семян также высокая $42,5...54,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и процент зараженности обработанных семян значительно ниже контроля. Что касается режимов при $P_{уд} = 509\text{ Вт/дм}^3$, то с понижением экспозиции нагрева семян с 60 до 30 с наблюдается повышение процента зараженности семян, происходит процесс стимуляции семенных инфекций.

Если проанализировать процесс, то получается, что на "минимальном" режиме обработки энергия расходуется на испарение пленки воды с поверхности материала, семена же в этот период времени являются прозрачной средой для ЭМП СВЧ и не нагреваются, поэтому не происходит уничтожения инфекции внутри семян. С повышением удельной мощности от $1529\text{ до }2548\text{ Вт/дм}^3$ и экспозиции обработки от 30 до 90 с, влага с поверхности материала испаряется, в результате возникает градиент влажности, температуры и давления. Начинается интенсивное удаление влаги из центральных слоев семян и когда его влажность приближается к начальному

значению, то температура внутри семян резко возрастает, что приводит к гибели семенной инфекции.

В ходе анализа полученных расчетов по разработанным критериям установлен режим, рекомендованный для внедрения в технологию предпосевной обработки семян рапса:

$$\tau = 60 \dots 90 \text{ с}, \quad P_{\text{уд}} = 1529 \text{ Вт/дм}^3, \quad t = 42,5 \dots 54,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Следует отметить, что рекомендованный режим по всхожести совпадает с предложенным вариантом для обеззараживания семян – здесь резко снижается зараженность семян за счет тепловой обработки, улучшаются их посевные качества.

В соответствии с выбранным планом эксперимента и теоретическими предпосылками по распределению температурных полей в рабочей камере СВЧ-устройств, были проведены исследования по распределению температурных полей в объеме обрабатываемого материала.

Результаты опытов представлены в виде гистограмм распределения температур по площади семян, с тепловизионными снимками и последующим анализом [4; 2; 9; 6; 7; 8; 10].

На рисунках 9 – 11 приведен анализ послойного измерения температур в объеме семенного материала, полученного с помощью тепловизора FLIR SYSTEMS THERMACAM P65 (с погрешностью измерения температур $\pm 2 \%$) при обработке семян рапса ЭМП СВЧ при следующих входных параметрах: $P_{\text{уд}} = 1529 \text{ Вт/дм}^3$, $t = 60 \text{ с}$. Температура семян изменяется от 27,3 до 46,7 $^{\circ}\text{C}$. (рисунок 9).

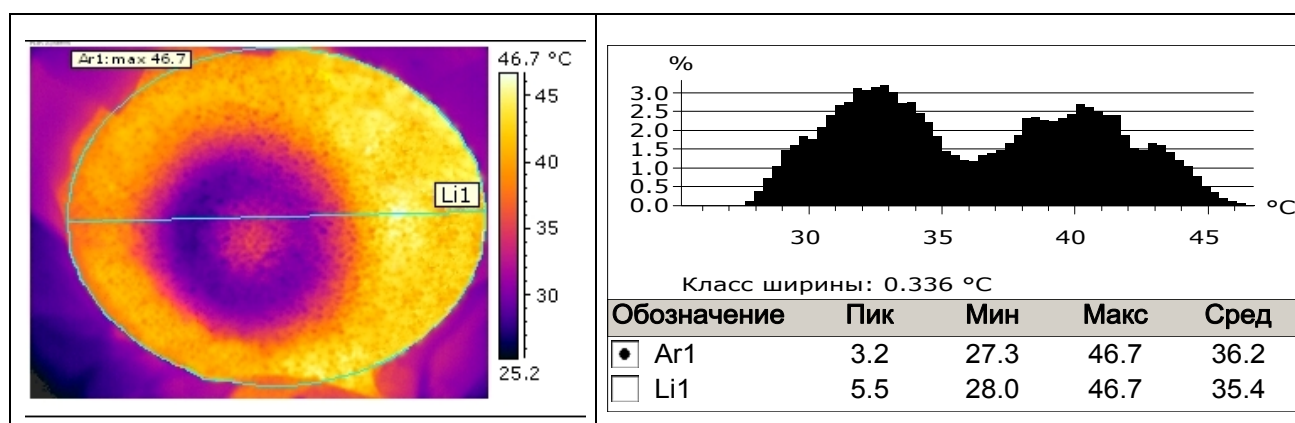


Рисунок 9 – Распределение температурных полей в верхнем (поверхностном) слое семян рапса

Анализ рисунка 10 показывает, что диапазон изменения температуры в среднем слое семян на глубине 15 мм изменяется от 28,2 до 49,7 $^{\circ}\text{C}$ (рисунок 10).

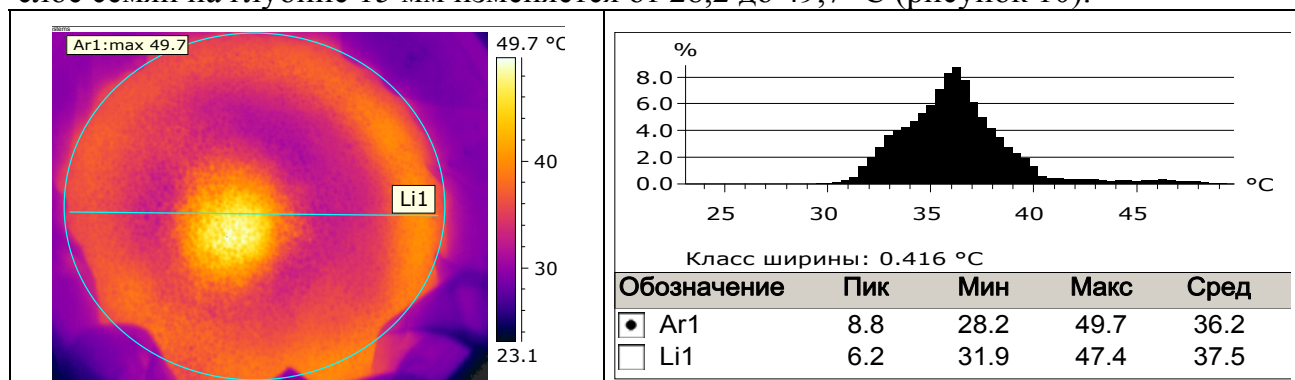


Рисунок 10 – Распределение температурных полей в среднем слое семян рапса

Анализ рисунка 11 показывает, что диапазон температуры в нижнем слое семян на глубине 30 мм (15 мм от дна) изменяется от 32 до 49,1 °С (рисунок 11).

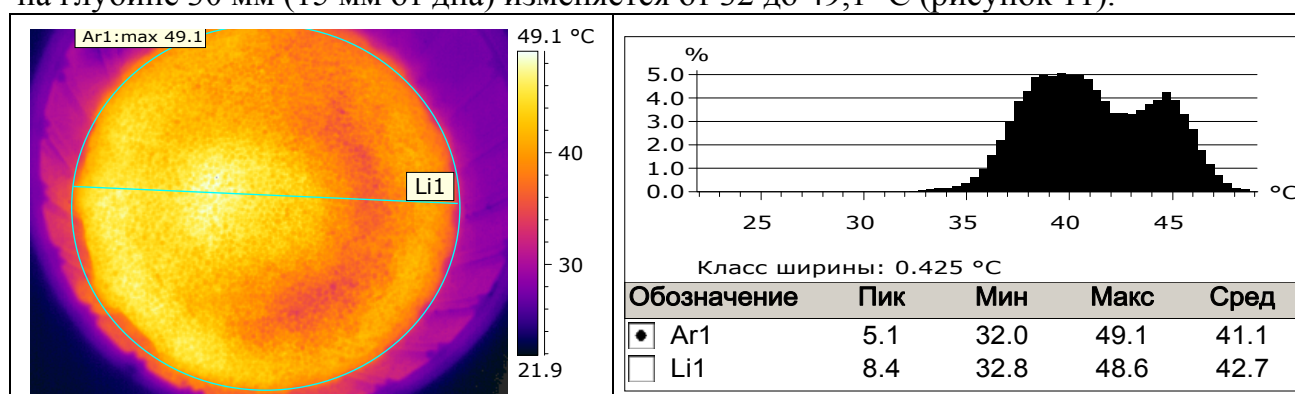


Рисунок 11 – Распределение температурных полей в нижнем слое семян рапса

Для статистической оценки полученных гистограмм разработаны электронные таблицы по расчету математического ожидания, дисперсии, среднеквадратичного отклонения и коэффициента вариации, результаты исследования распределения температурных полей представлены [2; 9; 6; 7; 8; 10].

При исследовании распределения температурных полей в объеме обрабатываемого материала и с целью определения влияния равномерности нагрева на энергию прорастания и лабораторную всхожесть, из обработанных семян отбирались навески для определения посевных качеств семян рапса путем проращивания в оптимальных условиях, для чего, после исследования температурных полей в послойных срезах, семена каждого слоя тщательно перемешивались и закладывались для проращивания в лабораторных условиях [1].

Для оценки зависимости равномерности нагрева ЭМП СВЧ на энергию прорастания и всхожесть семян рапса составлен график, приведенный на рисунке 12.

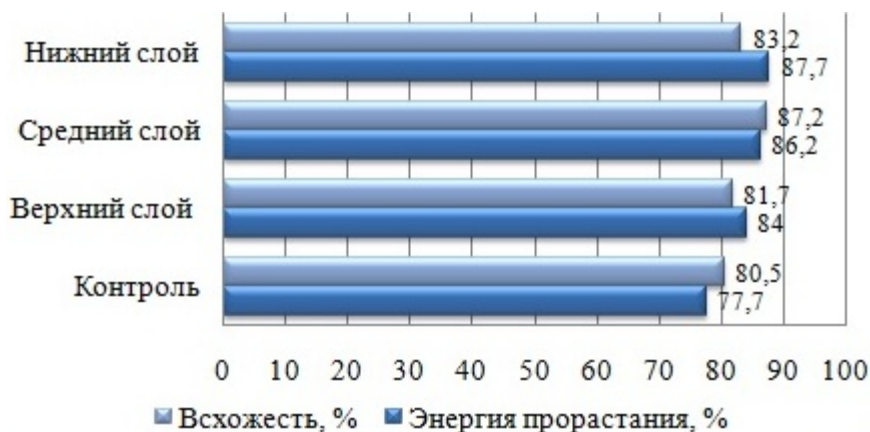


Рисунок 12 – Энергия прорастания и всхожесть семян рапса в послойных срезах обрабатываемого материала

Проведенными исследованиями температурных полей с помощью тепловизора доказано, что в бытовой микроволновой печи происходит неравномерный нагрев исследуемого материала, в связи с чем наблюдается различная лабораторная всхожесть.

По результатам анализа проведенных лабораторных опытов (см. таблицу и рисунок) доказано, что на увеличение лабораторной всхожести и энергию прорастания семян рапса влияет степень равномерности обработки семенного

материала в ЭМП СВЧ, и чем выше степень равномерности нагрева семян в ЭМП СВЧ, тем выше лабораторная всхожесть и энергия прорастания.

Оценка степени равномерности нагрева диэлектрического материала, помещенного в ЭМП СВЧ, может производиться с помощью разработанной методики, основанной на одновременном измерении тепловизором температуры во множестве точек объема обрабатываемого материала в горизонтальных плоскостях.

Четвертая глава «Конструктивная реализация и технико-экономическая оценка технологии предпосевной обработки семян ЭМП СВЧ» посвящена разработке технических средств для обработки семян рапса в ЭМП СВЧ, повышающих равномерность нагрева и оценке технико-экономической эффективности их внедрения.

Из-за неравномерного нагрева семенного материала, происходящего в бытовой микроволновой печи вследствие образования стоячих волн (см. главу 1), возникает необходимость более равномерной обработки семенного материала и добавления диссектора для «перемешивания» ЭМП СВЧ в рабочей камере, где происходит обработка. В связи с чем, семена прошли обработку в разработанной и изготовленной по техническому заданию и технической документации в 2013 году установке для термической обработки сыпучих диэлектрических материалов, согласно заявке на полезную модель № 2015153603 «Установка для предпосевной обработки семян СВЧ-энергией» от 14.12.2015 г. (см. рисунок 13), авторы: Бастрон А. В., Исаев А. В., Мещеряков А. В.

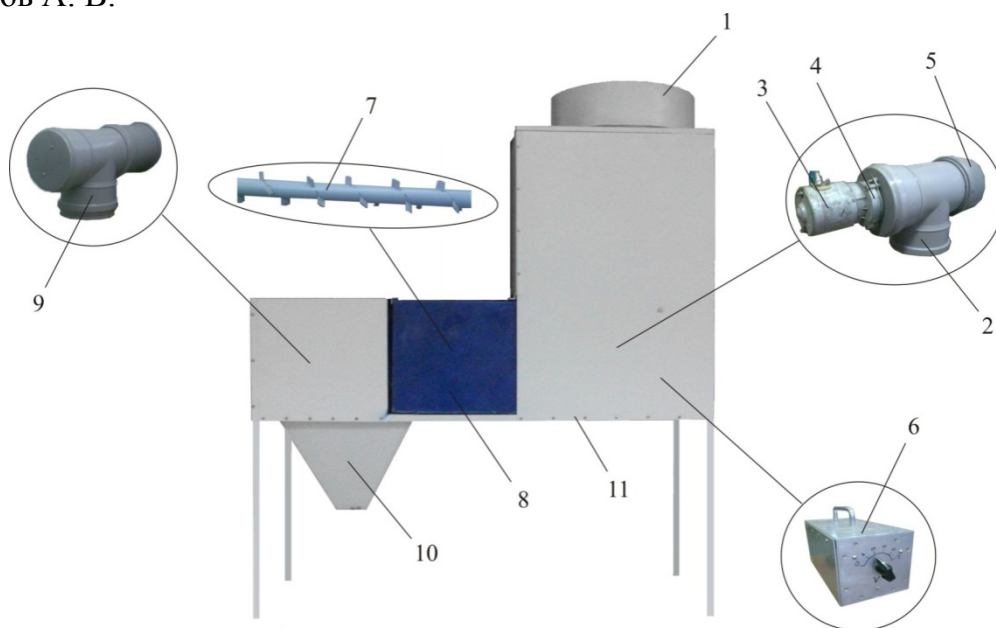


Рисунок 13 – Внешний вид экспериментальной установки для термической обработки сыпучих диэлектрических материалов: 1 – бункер-накопитель с дозатором подачи семян в рабочую камеру; 2 – загрузочное окно; 3 – электропривод шнекового транспортера; 4 – понижающий редуктор; 5 – кожух шнекового транспортера; 6 – понижающий трансформатор 220/12 В; 7 – шнековый транспортер оригинальной конструкции; 8 – СВЧ камера с блоком управления; 9 – выгрузное окно; 10 – бункер-накопитель обработанного семенного материала; 11 – каркас установки

В качестве основы для создания экспериментальной установки обеззараживания семян энергией СВЧ-поля взят патент РФ №2311002 на изобретение «Устройство для термообработки сыпучих диэлектрических материалов»

(Авторы: Бастрон А. В., Мещеряков А. В., Цугленок Н. В.), по которому согласно технического задания и технической документации соискателя в 2007 году [16] на кафедре электроснабжения сельского хозяйства изготовлена первая экспериментальная установка (рисунок 14), за основу которой была взята бытовая микроволновая печь марки «Phoenix Cold» мощностью 800 Вт



Рисунок 14 – Внешний вид экспериментальной установки обеззараживания семян энергией СВЧ – поля

Проведен опыт по обеззараживанию и стимуляции ростовых процессов семян на разработанной установке для термической обработки сыпучих диэлектрических материалов (согласно заявке на полезную модель № 2015153603 от 14.12.2015 г).

В предлагаемой установке нагрев семенного материала, как показали результаты эксперимента (рисунок 15), происходит более равномерно: температура семян изменяется от 35,3 до 42,8 °С.

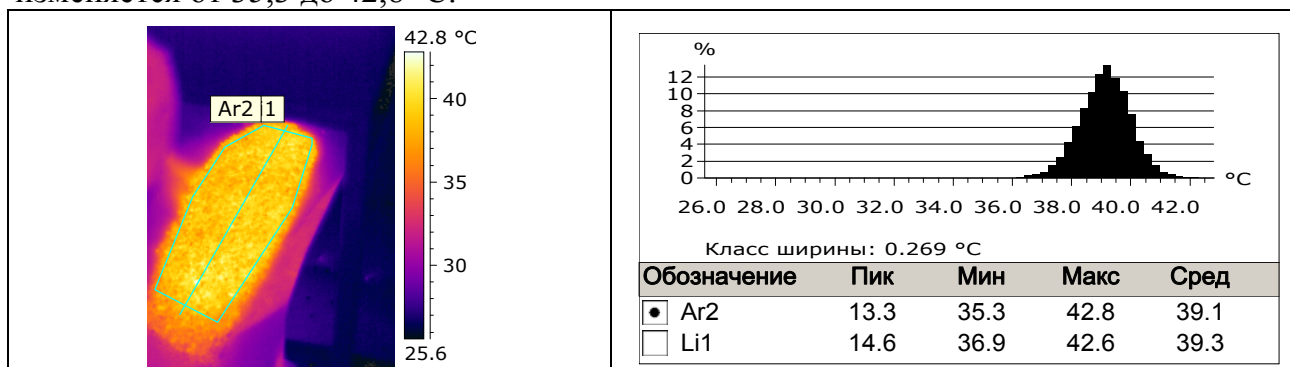


Рисунок 15 – Распределение температурных полей в семенах, прошедших обработку ЭМП СВЧ в установке, согласно заявке на полезную модель № 2015153603 от 14.12.2015 г.

С целью определения влияния равномерности нагрева на энергию прорастания и лабораторную всхожесть в разработанной и изготовленной установке для термической обработки сыпучих диэлектрических материалов, из обработанных семян отбирались навески для определения посевных качеств семян рапса путем проращивания в оптимальных условиях, для чего, после исследования температурных полей из выгрузного устройства, семена тщательно перемешивались и закладывались для проращивания в лабораторных условиях [1].

Для оценки влияния степени равномерности нагрева ЭМП СВЧ на энергию прорастания и всхожесть семян рапса составлен график, приведенный на рисунке 16.

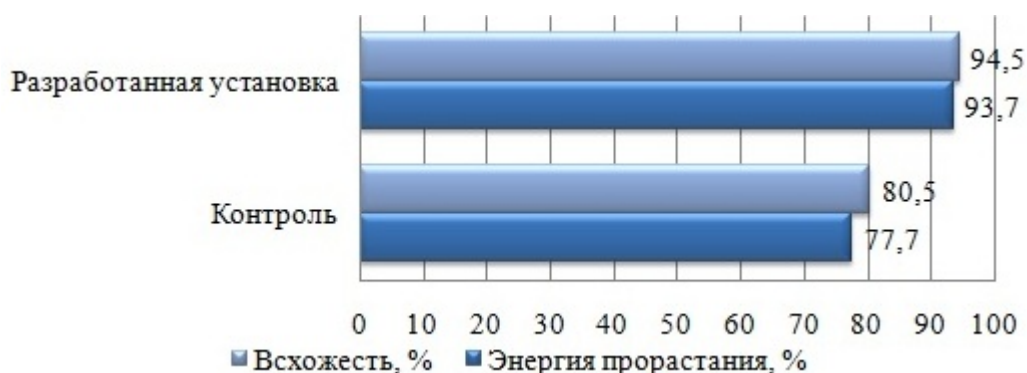


Рисунок 16 – Энергия прорастания и всхожесть семян рапса после обработки в разработанной СВЧ-установке

Разработанная и изготовленная установка для термической обработки сыпучих диэлектрических материалов позволяет повысить лабораторную всхожесть от 3 до 13,5 % (в сравнении с неравномерной обработкой, см. главу 3), снизить коэффициент вариации нагрева семян до ~ 2 %, по сравнению с ~ 5 – 13 % при обработке семян в бытовой микроволновой печи, т.е. в 2,5 – 6,5 раз. Полученный результат достигается благодаря постоянному перемешиванию семенного материала внутри рабочей камеры СВЧ-устройства шнеком, усовершенствованной конструкции.

Внедрение экспериментальной установки, повышающей равномерность нагрева, позволяет получить дополнительный доход в 1133,55 руб/га для засеваемой площади не менее 93 га при сроке окупаемости затрат в течение одного посевного сезона [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основным недостатком установок для обработки семян в ЭМП СВЧ является значительная неравномерность нагрева обрабатываемого материала, что не позволяет полностью уничтожить болезненную микрофлору на поверхности семян в зонах недогрева и ухудшает их посевные качества из-за перегрева отдельных слоев. Другие способы обеззараживания семян не в полной мере отвечают требованиям экологической безопасности.

2. В результате моделирования тепловых процессов в семени, установлен рациональный режим времени СВЧ-обработки на стандартной частоте микроволновой печи 2450 МГц, определяемый диапазоном 30...90 с и позволяющий нагревать семена до температур в пределах от 26,5 °С до 72,75 °С.

3. Определены основные входные параметры, влияющие на тепловую обработку семян: время обработки (экспозиция), (τ , с) и удельная мощность ЭМП СВЧ ($P_{уд}$, Вт/дм³). Входные параметры варьируются на трех уровнях: минимальном (-1); среднем (0); максимальном (+1).

4. Установлено, что обработка семян в ЭМП СВЧ снижает концентрацию фитопатогенной микрофлоры при сочетании режимов: $P_{уд} = 509$ Вт/дм³, $\tau = 90$ с, при температуре нагрева семян 31,25 °С, и при $P_{уд} = 1529$ Вт/дм³, $\tau = 60$ с, при температуре нагрева семян 42,5 °С. Полное уничтожение фитопатогенной микрофлоры происходит при $P_{уд} = 2548$ Вт/дм³, $\tau = 90$ с, и температуре нагрева семян 72,75 °С, однако такой режим недопустим, так семена под действием высокой температуры гибнут.

5. При всех режимах обработки наблюдается увеличение лабораторной всхожести от 2,5 до 20,1 %, относительно контроля; всхожесть ниже контроля отмечается только при жестком режиме ($P_{уд} = 2548 \text{ Вт/дм}^3$, $\tau = 60 - 90 \text{ с}$).

6. В ходе анализа полученных расчетов по разработанным критериям установлен режим, рекомендованный для внедрения в технологию производства рапса: $P_{уд} = 1529 \text{ Вт/дм}^3$, $\tau = 60 - 90 \text{ с}$.

7. Разработанная установка для термической обработки сыпучих диэлектрических материалов позволяет снизить коэффициент вариации нагрева семян до $\sim 2 \%$, по сравнению с $\sim 5 - 13 \%$ при обработке семян в бытовой микроволновой печи, т.е. в 2,5 – 6,5 раз, что позволяет повысить лабораторную всхожесть от 3 до 13,5 % (в сравнении с неравномерной обработкой). Полученный результат достигается благодаря постоянному перемешиванию семенного материала внутри рабочей камеры СВЧ-устройства шнеком, усовершенствованной конструкции.

8. Внедрение экспериментальной установки термической обработки сыпучих диэлектрических материалов для предпосевной обработки семян рапса, повышающей равномерность нагрева, позволяет получить дополнительный доход в 1133,55 руб/га для засеваемой площади не менее 93 га при сроке окупаемости затрат в течение одного посевного сезона.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Исаев, А. В. Исследование влияния степени неравномерности нагрева семян рапса в ЭМП СВЧ на их энергию прорастания и всхожесть / А. В. Исаев, А. В. Бастрон, В. С. Яхонтова // Вестник КрасГАУ. – 2016. – № 4. – С. 132.

2. Исаев, А. В. Исследование температурных полей при предпосевной обработке семян масличных культур ЭМП СВЧ / А. В. Бастрон, А. В. Исаев, А. В. Мещеряков, Н. В. Цугленок // Ползуновский вестник. – 2011. – №2/1. – С. 4.

3. Исаев, А. В. Разработка установки для посева семян с предварительной обработкой в СВЧ-поле / А. В. Исаев, А. В. Бастрон // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 9. – С. 155.

4. Исаев, А. В. Тепловизионные исследования температурных полей при предпосевной обработке семян сельскохозяйственных культур ЭМП СВЧ / А. В. Бастрон, А. В. Исаев // Научно-практический журнал Вестник ИрГСХА: выпуск 64. – 2014. – С. 79.

5. Исаев, А. В. Технико-экономическое сравнение вариантов установок для СВЧ-обработки семян рапса / А. В. Исаев, Н. Б. Михеева, В. С. Яхонтова // Научно-практический журнал Вестник ИрГСХА: выпуск 72. – 2016. – С. 98.

В других изданиях:

6. Исаев, А. В. Исследование температурных полей при предпосевной обработке семян рапса сверхвысокочастотным электромагнитным полем / А. В. Исаев, А. В. Бастрон // Инновационные тенденции развития российской науки. – Красноярск, 2015. – С. 151.

7. Исаев, А. В. Исследование температурных полей семян горчицы в бытовой микроволновой печи при предпосевной обработке ЭМП СВЧ / А. В. Исаев, А. В. Бастрон, А. В. Мещеряков // Студенческая наука – взгляд в будущее. – Красноярск, 2011. – Ч. 5. – С. 216.
8. Исаев, А. В. Исследование температурных полей семян горчицы при предпосевной обработке в СВЧ-установке шнекового типа / А. В. Исаев, А. В. Бастрон, А. В. Мещеряков // Студенческая наука – взгляд в будущее. – Красноярск, 2011. Ч. 5. – С. 218.
9. Исаев, А. В. Математическая оценка технологий нагрева семян в ЭМП СВЧ / А. В. Исаев, А. В. Бастрон // Инновационные тенденции развития российской науки. – Красноярск, 2015. – С. 148.
10. Исаев, А. В. Математическая оценка технологий нагрева семян в ЭМП СВЧ / А. В. Исаев, А. В. Бастрон, А. В. Мещеряков // Студенческая наука – взгляд в будущее. – Красноярск, 2011. – Ч. 5. – С. 220.
11. Исаев, А. В. Разработка технологической линии непрерывного процесса обеззараживания семян масленичных культур / А. В. Исаев, А. В. Мещеряков, Т. П. Ермоленко // Аграрная наука на рубеже веков. – Красноярск, 2007. – Ч. 2. – С. 169.
12. Исаев, А. В. Разработка установки для посева семян с предпосевной обработкой их СВЧ-энергией / А. В. Исаев, А. В. Бастрон, В. С. Яхонтова // Актуальные проблемы энергетики АПК. – Саратов, 2015. – С. 73.
13. Исаев, А. В. Разработка установки для предпосевной обработки семян СВЧ-энергией / А. В. Исаев, А. В. Бастрон // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии. – Иркутск, 2015. – Ч.2. – С. 35.
14. Исаев, А. В. Технологическая линия обработки семян энергией СВЧ – поля / А. В. Исаев, А. В. Мещеряков // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – Ачинск, 2008. – С. 226.
15. Исаев, А. В. Технологическая линия обработки семян энергией СВЧ-поля / А. В. Исаев, Н. А. Щербакова, М. М. Мутьева, Д. М. Мутьева, А. В. Мещеряков // Студенческая наука – взгляд в будущее. – Красноярск, 2008. – Ч. 4. – С. 200.
16. Исаев, А. В. Экспериментальная установка для предпосевной обработки семян энергией СВЧ-поля / А. В. Исаев, А. В. Бастрон, А. В. Мещеряков // Молодые ученые – науке Сибири : выпуск 3. – Красноярск, 2008. – Ч. 2. – С. 151.