

На правах рукописи

**Зуев Николай Александрович**

**СУШКА И ПРЕДПОСЕВНАЯ СТИМУЛЯЦИЯ СЕМЯН  
ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ  
В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 2013

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина»

Научный руководитель: Рудобашта Станислав Павлович  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Башилов Алексей Михайлович,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехнологий в сельскохозяйственном производстве ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»  
Липин Александр Геннадьевич,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой процессов и аппаратов химической технологии ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»

Ведущая организация: ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки»  
Россельхозакадемии, г. Москва

Защита состоится «22» апреля 2013г. в 13 00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.044.02 ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина» по адресу: 127550, г. Москва, ул. Лиственничная аллея, д.16а, корпус 3, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.  
Автореферат разослан и размещен на сайте «28» февраля 2013 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
профессор

Андреев С.А.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы диссертации.** Одной из основных задач сельскохозяйственного производства является повышение урожайности выращиваемых культур на основе использования современных технологий возделывания. Эффективным способом её решения является, в частности, повышение качества посевного материала с помощью воздействия на семена физическими факторами. Для этого в сельскохозяйственной практике используют разнообразные приемы предпосевной обработки семян – обогрев, воздействие электромагнитным полем и др. Перспективным способом сушки и стимуляции семенного материала является его термообработка инфракрасными лучами с применением осциллирующего температурного режима. При применении этой технологии исключается перегрев материала, и улучшаются его семенные качества, сокращаются энергозатраты и увеличивается эффективность сушки.

Однако этот процесс исследован далеко не полностью, не изучено сохранение стимулирующего эффекта в зависимости от продолжительности хранения семян до момента их высева, не исследовано влияние начальной влажности семян, продолжительности ИК-воздействия температурного режима ОИКТ на качественные показатели семян, длительности сохранения эффекта стимуляции. Не исследована динамика температурного поля, развивающегося в семени при осциллирующей ИК-сушке.

Вышеизложенное предопределяет актуальность избранной темы и определяет цель и задачи исследования.

**Объект исследования:** семена овощных культур, отличающиеся низкой всхожестью.

**Предмет исследования.** Осциллирующая инфракрасная термообработка семян как средство сушки и стимуляции семян.

**Методы исследования.** Лабораторные экспериментальные исследования ИК-термообработки, энергии прорастания, всхожести семян, их влажности в соответствии с нормативными документами, статистические методы обработки опытных данных, аналитические методы теплопроводности, методы математического моделирования с постановкой вычислительных экспериментов.

**Цель работы.** Совершенствование технологий сушки и стимуляции семян.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

1. Определить, какое место занимает осциллирующая ИК-термообработка (сушка) семян в системе производства и подготовки семян к посеву. Установить режимы и параметры осциллирующей ИК-термообработке (ОИКТ), при которых достигается наибольший эффект стимуляции семян, т.е. повышение энергии прорастания и всхожести.
2. Провести теоретическое исследование тепломассопереноса при осциллирующем электромагнитном подводе энергии к высушиваемому материалу, в том числе при ОИКТ.
3. Разработать инженерную методику расчёта процесса осциллирующей ИК-сушки семян.
4. Исследовать массопроводные свойства семян и их равновесную влаж-

ность, что необходимо для реализации этой методики.

5. Дать анализ экономической эффективности осциллирующей ИК-термообработки (сушки) семян.

#### **Научная новизна результатов работы.**

1. Определен характер влияния технологических параметров ОИКТ: начальной влажности семян (длительности замачивания при предпосевной обработке), продолжительности ИК-термообработки, максимальной температуры нагрева семян в цикле, температурного гистерезиса, длительности хранения семян после ОИКТ, на величину стимулирующего эффекта.
2. Впервые сформулирована и аналитически решена задача взаимосвязанного теплопереноса в пластине (слое) при электромагнитном энергоподводе.
3. Проведено компьютерное моделирование процесса ИК-термообработки, показана целесообразность ее применения для выбора режимных параметров процесса. Проанализирован эффект термовлагопроводности в этом процессе.
3. Предложен метод расчета ИК-сушки с использованием найденного решения. Исследованы теплопроводные и гигротермические свойства ряда семян.
4. Дана экономическая оценка эффективности применения ОИКТ для сушки семян, собранных с поля, и для их предпродажной и предпосевной стимуляции.

#### **Практическая ценность полученных результатов и их реализация.**

1. Полученные в результате исследования данные обосновывают целесообразность и эффективность применения осциллирующей инфракрасной термообработки жизнеспособных семян, особенно с низкими посевными качествами.

2. Определены режимы и параметры осциллирующей ИК-термообработки исследованных семян с целью достижения наибольшего стимулирующего эффекта. Подана заявка на патент (№ 2012158013, 28.12.20112 «Способ осциллирующей инфракрасной термообработки семян»).

3. Предложен метод расчёта кинетики осциллирующей ИК-сушки для практического использования данных по теплопроводности и равновесному влагосодержанию семян.

4. Рекомендованы типы аппаратов для проведения процесса ОИКТ и дана экономическая оценка целесообразности применения осциллирующей ИК-технологии для сушки семян, собранных с поля, и для их предпродажной и предпосевной стимуляции.

5. Разработанные методики экспериментального исследования ИК-стимуляции семян и теоретически обоснованные методы расчета взаимосвязанного теплопереноса при осциллирующей электромагнитной сушке материалов могут быть использованы для решения аналогичных задач для других объектов исследования и используются в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 140100.68 – «Теплоэнергетика и теплотехника».

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных исследований по ОИКТ семян.
2. Математическая модель взаимосвязанного теплопереноса для пластины (слоя) в условиях электромагнитной сушки (ИК-сушки, сушки токами высокой и сверхвысокой частоты).

3. Результаты компьютерного моделирования ОИКТ.

4. Метод расчета кинетики осциллирующей ИК-сушки,

**Апробация результатов работы.** Основные положения работы доложены и обсуждены на IV междунар. научно-практич. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка, термовлажностная обработка материалов), СЭТТ-2011» (Москва, 2011); междунар. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Ресурсоэнергосберегающие технологии и оборудование» (Киев. Национальный технич. ун-т. Украины, 2011); междунар. научно-практич. конф. «Инновационные энергоресурсосберегающие технологии» (Москва, МГАУ, 2012); соискатель награжден грамотой за активное участие во II этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди аспирантов вузов Министерства сельского хозяйства РФ по Центральному федеральному округу (технич. науки) (Рязань, 2012).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка литературы, изложена на 185-ти страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 22 таблицы, списка использованных источников (135 наименований) и приложения.

#### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и основные задачи работы, представлены объект и предмет исследования, охарактеризована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, отражена структура диссертации.

**В первой главе** выполнен анализ современного состояния проблемы сушки и стимуляции семян сельскохозяйственных культур. Охарактеризованы свойства семян как объектов сушки и стимуляции, представлены современные способы сушки и стимуляции семян, их аппаратное обеспечение. Показано, что с целью повышения качества посевного материала весьма эффективным является применение ИК-сушки и термообработки. Анализ трудов ряда отечественных и зарубежных учёных в этой области позволил очертить область применения этого способа сушки и стимуляции и сформулировать задачи, требующие решения. Существенные результаты по сушке, в том числе по ИК-сушке, получены в работах А.В. Лыкова, А.С. Гинзбурга, П.Д. Лебедева, В.В. Красникова, С.Г. Ильясова, А.М. Башилова, Ю.М. Плаксина, В. Ф. Сорочинского, А.Г. Липина, Я.А. Долациса, J.G.Brennan, Kudra T., Strumillo Cz. и др. Несмотря на значительное количество работ, выполненных по этой теме, вопросы сохранения качества термолабильных материалов, высушиваемых ИК-способом, изучены недостаточно, что затрудняет применение данного способа сушки на практике. Это в полной мере относится к семенам овощных культур.

Предшествующие исследования показали (С.А. Проничев, И.В. Григорьев), что в процессе осциллирующей инфракрасной сушки (ИК-сушки) происходит не только сохранение посевных качеств семян, но и их улучшение. Однако этот процесс исследован далеко не полностью, не изучено сохранение стимулирующего эффекта в зависимости от продолжительности хранения семян до момента

их высева, не исследовано влияние начальной влажности семян и продолжительности ИК-воздействия, температурного режима ОИКТ на качественные показатели семян овощных культур, нетрадиционных и редких растений. Не исследована динамика температурного поля, развивающегося в семени при осциллирующей ИК-сушке. Причинами, сдерживающими использование ОИКТ семян, является также отсутствие математического описания динамики связанного тепломассопереноса в этом процессе, на основании которого можно было бы рекомендовать оптимальные температурные режимы сушки и разработать методику расчета ОИКТ.

В конце главы сформулированы выводы и задачи исследования.

**Во второй главе** представлено описание лабораторной экспериментальной установки и методики экспериментального исследования ОИКТ. Установка включала сушильную камеру, оснащенную двумя лампами OSRAM Siccatherm, бесконтактным пирометром «Raytek MID LT 02», двумя 2-х канальными измерителями-регуляторами температуры «ТРМ202», интерфейсом «АС 4», датчиком влажности и температуры воздуха «МЕЛА», весами «Scale Cas MWP-300», термоанемометром «testo 405». Система управления процессом ОИКТ семян осуществлялась с использованием программного обеспечения компании «Овен». По сигналам пирометра, отслеживающего температуру поверхности высушиваемых семян, и по уставкам температур на регуляторах ТРМ202 реализовывался осциллирующий режим сушки. Сигналы от пирометра поступали на приборы ТРМ202, которые предварительно программировались на рабочие температуры семян. В диссертации представлены технические характеристики измерительных приборов.

Опытная установка позволяла реализовать ОИКТ семян, обеспечивала необходимую точность поддержания заданных температур семян, давала возможность варьировать параметры процесса, осуществлять контроль и сохранение полученных данных в реальном времени с последующей их обработкой.

Семена при ОИКТ располагались в виде монослоя на сетке, расположенной в отверстии днища сушильной камеры, и непрерывно обдувались продольным потоком атмосферного воздуха со скоростью 1,5 м/с. Процесс ОИКТ протекал в заданном температурном интервале  $t_{\min} \dots t_{\max}$ . Средняя температура семян в процессе составляла  $t_{\text{cp}} \approx (t_{\min} + t_{\max}) / 2, ^\circ\text{C}$ . Этот температурный режим поддерживался с помощью системы автоматического регулирования, которой была оснащена установка. Выбранные в качестве источников ИК-излучения лампы «OSRAM Siccatherm» по своим спектральным характеристикам из числа исследованных ранее излучателей в наибольшей степени соответствовали объектам исследования – семенам выбранных культур, обеспечивая наибольший стимулирующий эффект семян при их ОИКТ. Эти лампы имеют максимум излучения на длине волны 1,1 мкм.

В качестве объектов исследования осциллирующей ИК-стимуляции были выбраны семена, обладающие разной всхожестью и разными теплофизическими параметрами: горчицы белой сорта «ВНИИМК-12», лука репчатого сорта «Штутгартер ризен», пшеницы яровой сорта «Приокская», сладкого перца сор-

та «Соната». В работе приведены требования к посевным качествам исследованных семян.

Высушенные семена после опыта делили на две части, одну из которых использовали для анализа влажности, а вторую - для определения всхожести и энергии прорастания. Всхожесть и энергию прорастания (условия проращивания семян) определяли по ГОСТ 12038-84.

Влажность семян определяли весовым методом по ГОСТ 12041-82. «Семена сельскохозяйственных культур. Метод определения влажности». Значения температуры семян, воздуха на входе и выходе из сушильной камеры архивировались в ПК с помощью программы «Owen Report Viewer» для обработки. По результатам экспериментов строили кривые сушки и кривые скорости сушки для анализа кинетического режима процесса ИК - стимуляции семян.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментального исследования осциллирующей ИК-термообработки семян овощных культур. Предварительное исследование стимуляции семян, обладающих различной всхожестью (семян пшеницы, перца сладкого и горчицы белой), показало, что целесообразно использовать метод осциллирующей ИК-стимуляции для жизнеспособных семян с пониженными посевными качествами.

К таким семенам можно отнести семена лука репчатого. Именно семена этого типа были выбраны в качестве основного объекта исследования. В опытах исследовали влияние на стимулирующий эффект четырех факторов: 1) длительности замачивания семян перед ОИКТ, 2) времени последующей ОИКТ, 3) температурного режима термообработки; 4) длительности сохранения эффекта стимуляции во времени. Определяли их влияние на всхожесть (В, %) и энергию прорастания (ЭП, %) семян лука. За контроль принимали энергию прорастания и всхожесть не стимулированных семян.

При изучении *влияния начальной влажности* семян лука (времени их замачивания) на их энергию прорастания и всхожесть продолжительность ОИКТ для всех опытов этой серии устанавливали одну и ту же (40 мин), т.к. предварительные исследования показали, что именно при этой продолжительности ОИКТ достигался наибольший стимулирующий эффект для семян лука. Наибольший стимулирующий эффект по всхожести был достигнут при замачивании семян лука в течение 3 часов (увеличение всхожести в 1,68 раз по сравнению с контролем). Однако, кратковременное замачивание (10 мин) дает практически такой же результат по всхожести (увеличение всхожести в 1,66 раз по сравнению с контролем) - рис.1.

Во второй серии опытов исследовали *влияние длительности ОИКТ* на энергию прорастания и всхожесть семян. Время замачивания, следовательно, и начальную влажность для этих опытов устанавливали одну и ту же (3 часа). Эту длительность замачивания выбрали потому, что, как показали исследования, представленные в предыдущем параграфе, при этом времени замачивания достигается наибольший эффект стимуляции семян лука. Как видно из рис. 2, наибольшее увеличение энергии прорастания и всхожести семян достигается при длительности осциллирующей ИК-термообработки, равной 40 мин.

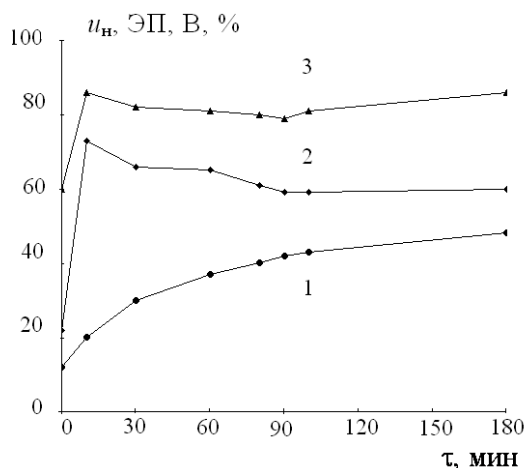


Рис. 1. Зависимость  $u_n$  (1), ЭП (2), В (3) семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» от  $\tau$ , при ИК-стимуляции 40 мин (контроль:  $u_n = 12\%$ , ЭП = 13%, В = 50 %); ( $q_0 = 1890 \text{ Вт/м}^2$ ;  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ ,  $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$ ).

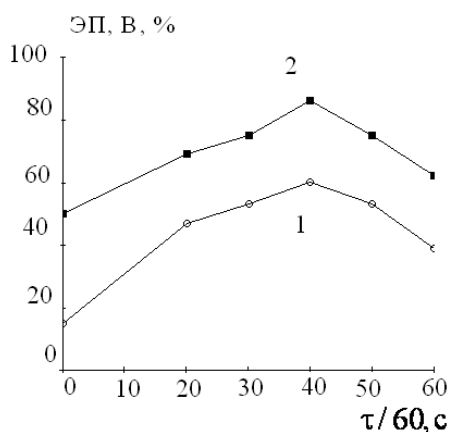


Рис. 2. Зависимость ЭП (1) и В (2) семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» от  $\tau_r$  при  $\tau_3 = 3 \text{ ч}$  (контроль: ЭП = 13%, В = 50 %); ( $q_0 = 1890 \text{ Вт/м}^2$ ;  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ ,  $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$ ).

Изучено влияние температурного режима ОИКТ на энергию прорастания и всхожесть семян. Предыдущие исследования по ОИКТ были проведены нами при условии, что минимальная температура нагрева семян составляла  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ , а максимальная -  $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$ , средняя их температура в цикле при этом была равна  $37^\circ\text{C}$ . Изучено так же влияние максимальной температуры нагрева семян в цикле и температурного гистерезиса  $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$  на эффект стимуляции. Исследования проводили в два этапа, на первом этапе меняли величину  $t_{\max}$  при неизменной величине  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ .

Семена лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» предварительно замачивали в воде при комнатной температуре в течение 3 час и затем 40 минут подвергали ИК-термообработке. В работе приведены термограммы нагрева семян соответственно при  $t_{\max} = 40, 50$  и  $60^\circ\text{C}$ . Средняя температура семян в циклах при этом составляла соответственно  $37, 42$  и  $47^\circ\text{C}$ . В качестве примера на рис. 3 приведена термограмма при  $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$ . Она показывает характер изменения температуры поверхности семян. Применение измерительно-регулирующей системы, использованной в опытах, позволяло надёжно поддерживать температуру материала в заданных пределах при применении таких малоинерционных излучателей как лампы OSRAM.

С увеличением температуры  $t_{\max}$  длительность цикла плавно увеличилась (см. табл. 2). Увеличение длительности цикла с ростом температуры  $t_{\max}$  вполне закономерно: при постоянной плотности теплового потока, поступающего на семена, время достижения более высокой температуры возрастает, соответственно увеличивается и время остывания.

Подвергнутые осциллирующей ИК-термообработке семена были испытаны на всхожесть и энергию прорастания по описанной выше методике. В таблице 1 приведены сравнительные данные по всхожести и энергии прорастания семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен», из которых следует, что максимальное увеличение энергии прорастания и всхожести имело место при температур-



ном режиме:  $t_{\min} = 34^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$ , в котором средняя температура семян в цикле была равна  $37^{\circ}\text{C}$ .

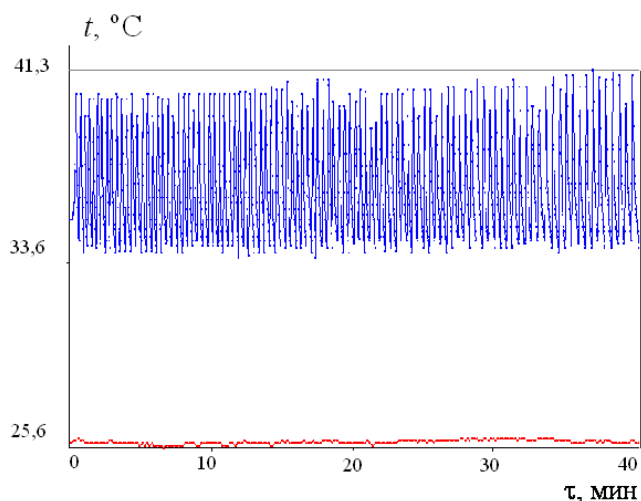


Рис. 3. Экспериментальная термограмма  $t_n = f(\tau)$  семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» при осциллирующей инфракрасной термообработке (сушке) монослоя семян ( $q_0 = 1890 \text{ Вт/м}^2$ ;  $v = 1.8 \text{ м/с}$ ; лампы OSRAM;  $u_n = 0,49 \text{ кг вл./кг сух. м-ла}$ ;  $t_{\min} = 34^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$ ).

Во второй серии опытов изучали влияние температурного гистерезиса  $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$  на эффект стимуляции.

Опыты проводили при условии, что  $\bar{t} = 37^{\circ}\text{C}$ ; при этом: 1)  $t_{\min} = 34^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{t} = 37^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t = 6^{\circ}\text{C}$ ; 2)  $t_{\min} = 31^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 43^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{t} = 37^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t = 12^{\circ}\text{C}$ ; 3)  $t_{\min} = 28^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 46^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{t} = 37^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t = 18^{\circ}\text{C}$ .

Опыты проводили при условии, что  $\bar{t} = 37^{\circ}\text{C}$ ; при этом: 1)  $t_{\min} = 34^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{t} = 37^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t = 6^{\circ}\text{C}$ ; 2)  $t_{\min} = 31^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 43^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{t} = 37^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t = 12^{\circ}\text{C}$ ; 3)  $t_{\min} = 28^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 46^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{t} = 37^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t = 18^{\circ}\text{C}$ .

В работе приведены термограммы, соответствующие этим режимам ИК-термообработки. С увеличением температурного гистерезиса длительность цикла возрастала (табл. 2). Семена, подвергнутые описанной выше ИК-термообработке, анализировали на всхожесть и энергию прорастания. В табл. 2 показано, как влияет параметр  $\Delta t$  на энергию прорастания и всхожесть семян. Из таблицы следует, что стимуляцию семян давал только температурный режим  $t_{\min} = 34^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$ , что касается режимов  $t_{\min} = 31^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 43^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\min} = 28^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 46^{\circ}\text{C}$ , то они не только не стимулировали семена, а наоборот оказывали на них угнетающее воздействие и поэтому не приемлемы.

Следующая серия опытов позволила установить, что эффект стимуляции сохранялся длительное время (табл. 3). Это означает, что стимулировать семена можно как непосредственно перед посевом, так и в процессе сушки семян, собранных с поля, – применяя осциллирующий ИК-способ.

В процессе длительного хранения семян их всхожесть и энергия прорастания снижаются, поэтому для поставщиков семян на рынок представляет интерес повышение посевных качеств семян без их предварительного замачивания. В связи с этим была проведена осциллирующая ИК-стимуляция семян без предварительного замачивания. Стимулировали семена огурцов. Продолжительность ИК-стимуляции составляла 10, 20 и 40 мин. Семена для стимуляции предоставила ООО «Агрофирма «Гавриш» и К». Наибольший эффект стимуляции проявился для сухих семян с низкой всхожестью ( $V=35\%$ ) - при режиме 40 мин. (увеличение всхожести в 2,43 раза).

Поскольку ОИКТ может использоваться не только в качестве предпосевной обработки семян с целью их стимуляции, но и осенью после сбора семян с

Таблица 1

Влияние  $t_{\max}$  при ОИКТ на ЭП и В семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» ( $\tau_3 = 3$  ч;  $\tau_T = 40$  мин,  $q_0 = 1890$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ )

№	$t_{\max}, ^\circ\text{C}$	Средняя температура семян в цикле, $^\circ\text{C}$	Длительность цикла, с	Влагосодержание после замачивания, %	Энергия прорастания, ЭП, %	Всхожесть, В, %	Влагосодержание конечное, %	Увеличение всхожести
1.	40	37 $^\circ\text{C}$	23	48,1	73	84 $\pm$ 4	15,0	в 1,68
2	50	42 $^\circ\text{C}$	100	48,7	44	75 $\pm$ 3	12,4	в 1,50
3	60	47 $^\circ\text{C}$	300	48,6	5	16 $\pm$ 2	9,4	в 0,32
4	Контроль			12	13	50 $\pm$ 3	-	-

Таблица 2

Влияние температурного гистерезиса при ОИКТсемян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» на ЭП и В ( $\tau_3 = 3$  ч,  $\tau_T = 40$  мин,  $q_0 = 1890$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{\text{cp}} = 37^\circ\text{C}$ )

№ а	Условия опыта		Температурный гистерезис $\Delta t, ^\circ\text{C}$	Средняя длительность цикла «нагрев-охлаждение», с	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %
	$t_{\min}, ^\circ\text{C}$	$t_{\max}, ^\circ\text{C}$				
1	34	40	6	60	73	84 $\pm$ 4
2	31	43	12	80	4	18 $\pm$ 2
3	28	46	18	200	0	12 $\pm$ 2
4	Контроль				13	50 $\pm$ 3

Таблица 3

Влияние  $\tau_x$  семян лука сорта «Штутгартер ризен» на ЭП и В (ОИКТ при  $q_0 = 1890$  Вт/м<sup>2</sup>; лампы OSRAM;  $\tau_3 = 3$  ч ( $u_n = 0,49$  кг вл./кг сух. м-ла));  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ ;  $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$ ).

№	Тип семян	Контроль		Посев сразу после ИК-сушки		Посев через 4 месяца		Посев через 8 месяцев	
		ЭП, %	В, %	ЭП, %	В, %	ЭП, %	В, %	ЭП, %	В, %
1	Горчица	85	93 $\pm$ 3	92	95 $\pm$ 4	95	99 $\pm$ 1	94	98 $\pm$ 2
2	Пшеница	87	92 $\pm$ 4	89	97 $\pm$ 5	91	97 $\pm$ 4	97	99 $\pm$ 1
3	Лук	13	50 $\pm$ 3	73	84 $\pm$ 6	65	71 $\pm$ 3	60	70 $\pm$ 4

(Условные обозначения таблиц 1-3 приведены в конце автореферата)

поля – с целью их сушки и стимуляции, то в этом случае необходимо рассчитывать продолжительность сушки до достижения кондиционной влажности. Поэтому в опытах по ОИКТ снимали также кривые сушки, с целью анализа скорости сушки.

Наблюдаемую стимуляцию семян под воздействием ИК-облучения можно объяснить тем, что в материалах растительного и животного происхождения происходит резонансное воздействие поглощаемой энергии на молекулы воды - при совпадении их частот, что вызывает интенсификацию процессов биохимических превращений.

В работе представлены кривые сушки и кривые скорости сушки, дан их анализ. На рис. 4 приведены кривые осциллирующей ИК-сушки семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» (в диссертации приведены кривые сушки для всех исследованных семян). Рассмотрение полученных кривых сушки показывает, что сушка семян овощных культур протекает во втором периоде, который, таким образом, является характерным для исследуемых материалов. Полученные кривые сушки были продифференцированы - с целью получения кривых скорости сушки (одна из кривых скорости сушки приведена на рис. 5). Кривые сушки при осциллирующем ИК-энергоподводе имеют гладкий монотонный характер, на характере которых не проявляются осцилляции температуры материала, что следует учитывать при разработке инженерного метода расчёта кинетики сушки.

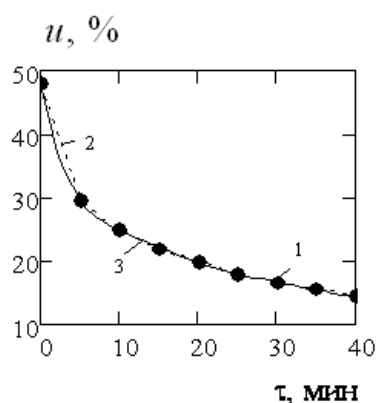


Рис. 4. Кривая ОИКС семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» (лампы OSRAM,  $q_0 = 1890 \text{ Вт/м}^2$ ;  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ ;  $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$ ;  $\tau_3 = 3 \text{ ч}$ ): 1- эксперимент; 2- аппроксимация точек; 3- сглаживающая линия.

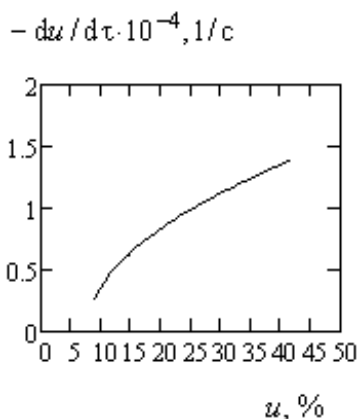


Рис. 5. Кривая скорости сушки семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен».

**В четвёртой главе** сформулирована и аналитически решена задача взаимосвязанного тепломассопереноса при сушке в осциллирующем электромагнитном поле плоского материала (пластина или плоский слой высушиваемого материала), обдуваемого потоком газа (сушильного агента). На основе её решения разработана математическая модель процесса, показана её адекватность реальному процессу при принятых условиях и допущениях. Сначала сформулирована и решена задача массопроводности, найдена интенсивность сушки  $i(\tau)$ . Затем сформулирована задача одностороннего нагрева пластины (слоя) в осциллирующем электромагнитном поле с учётом стока теплоты на испарение влаги :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{c\rho} \mu^* q_0 \exp[-\mu^* R - x] A f_1 \tau, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < R; \quad (1)$$

$$t(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = f_2(x), \quad 0 \leq x \leq R; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \tau > 0; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=R} = \alpha(t_c - t(R, \tau)) - r^* \cdot i(\tau), \quad \tau > 0, \quad (4)$$

где  $a, c, \rho_0, \mu^*, q_0, A, \lambda, \alpha, R, t_c, r^* = \text{const}$ ;  $f_1 \tau$  - единичная периодическая функция, отражающая цикличность облучения

$$f_1(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \eta(\tau - n\tau_{\text{ц}}) - \eta(\tau - (n\tau_{\text{ц}} - n\tau_{\text{наг}})), \quad (5)$$

где  $\eta$  - единичная функция Хэвисайда.

Выражение  $q(x) = \mu^* q_0 \exp[-\mu^* R - x]$  в (1) описывает количество тепловой мощности, выделяющейся в единице объёма пластины в плоскости с координатой  $x$  - в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера, Вт/м<sup>3</sup>. Математическая формулировка задачи предполагает, что сток теплоты на испарение влаги происходит у поверхности тела. Задача решена с помощью таблиц Карташова методом конечных интегральных преобразований.

Путём сравнения расчетных кривых нагрева (рис.6) с имеющимися в литературе экспериментальными кривыми нагрева (рис.7) при осциллирующей ИК-сушке показано, что полученное аналитическое решение задачи взаимосвязанного тепломассопереноса при осциллирующей электромагнитной сушки адекватно описывает реальный процесс и, следовательно, может быть использовано для инженерных расчетов.

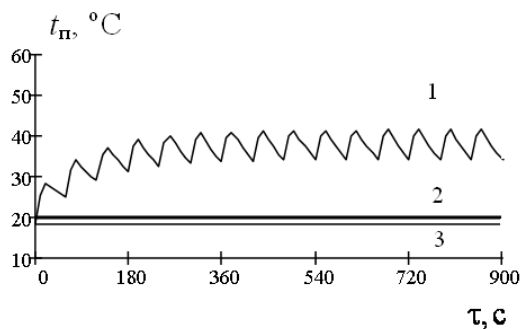


Рис. 6. Расчетная функция  $t_n = f(\tau)$  для семян огурца сорта “Водолей” при ОИКС: 1 -  $t_n = f(\tau)$ ; 2 -  $t_c = 20^\circ\text{C}$ ; 3 -  $t_n = 18^\circ\text{C}$  ( $q_0 = 1890 \text{ Вт/м}^2$ ;  $v = 1.8 \text{ м/с}$ ; лампы OSRAM;  $u_n = 0.51 \text{ кг/(кг сух. м-ла)}$ ;  $t_{\text{max}} = 40^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{min}} = 34^\circ\text{C}$ ).

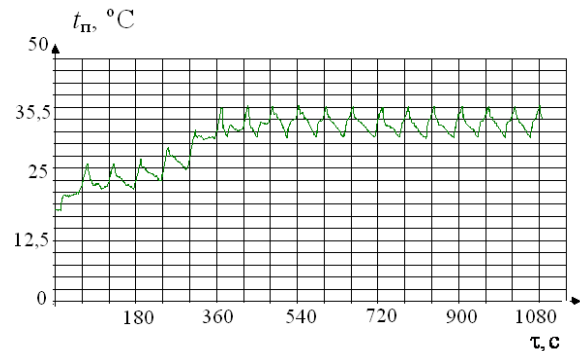


Рис. 7. Экспериментальная функция  $t_n = f(\tau)$  для семян огурца сорта “Водолей” при ОИКС ( $q_0 = 1890 \text{ Вт/м}^2$ ;  $v = 1.8 \text{ м/с}$ ; лампы OSRAM;  $u_n = 0.51 \text{ кг/(кг сух. м-ла)}$ ;  $t_{\text{max}} = 40^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{min}} = 34^\circ\text{C}$ ) (данные И.В. Григорьева).

Полученное решение позволяет путем численных расчетов правильно выбирать скорость обдува газовой средой поверхности тела, что важно для термолабильных материалов. Показано, что при осциллирующей ИК-сушке у поверхности материала возникает отрицательный температурный градиент (рис.9). Он вызывает поток термовлагодобности, который, складываясь с

потоком массопроводности, интенсифицирует процесс – в отличие от потока термовлагодпроводности при конвективной сушке, который замедляет процесс. Для повышения точности кинетического расчета процесса ИК-сушки семян зональным методом при выборе значений теплофизических характеристик, в частности, основного кинетического параметра – коэффициента массопроводности  $k$  – предложено определять среднюю температуру материала по толщине слоя и времени сушки в концентрационных зонах по соответствующим уравнениям, приведенным в работе (рис.8). Проведены расчеты, иллюстрирующие эту методику.

**Пятая глава** посвящена разработке аппаратного оформления ОИКТ семян, инженерной методики расчёта сушилки, экономическому анализу эффективности процесса осциллирующей термообработки семян. Применительно к процессу осциллирующей ИК-сушки семян разработана инженерная методика ее кинетического расчета, основанная на аналитическом решении задачи массопроводности и зональном методе, составной частью которой является расчет динамики температурного поля на основе полученного в работе аналитического решения задачи взаимосвязанного тепломассопереноса. Получены опытные данные по коэффициентам массопроводности (в зависимости от температуры и влагосодержания семян) и равновесному влагосодержанию ряда семян, необходимые для этих расчетов, обобщенные для удобства расчетов аналитическими зависимостями. Путем сопоставления опытных и расчетных кривых сушки (рис. 10) в условиях осциллирующего ИК-энергоподвода с использованием полученных данных по коэффициенту массопроводности и равновесному влагосодержанию показана адекватность математической модели, описывающей кинетику сушки, реальному процессу.

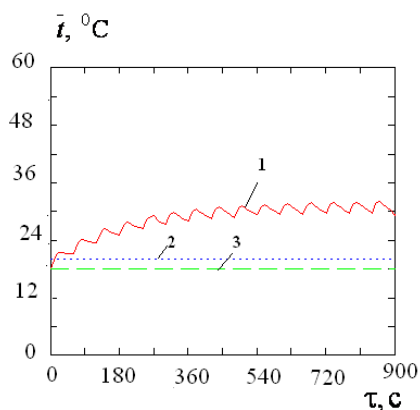


Рис. 8.  $\bar{t} = f(\tau)$  при ОИКС пластины (слоя)  
 ( $R=5 \cdot 10^{-3}$  м;  $q_0 = 1980$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\tau_{\text{нар}}=15$  с;  
 $\tau_{\text{ц}}=60$  с;  $\mu^*=921$  м<sup>-1</sup>;  $\alpha = 50$  Вт/(м<sup>2</sup> К);  $\beta_c =$   
 $0,054$  м/с;  $i = 1,416 \cdot 10^{-6}$  кг/(м<sup>2</sup> с)): 1 –  $\bar{t}(\tau)$ ;  
 2 –  $t_c = 20^\circ\text{C}$ , 3 –  $t_n = 18^\circ\text{C}$ .

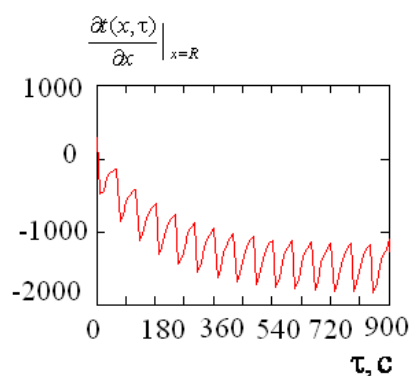
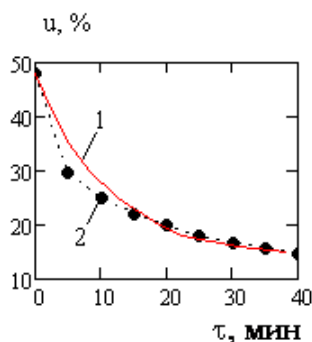


Рис. 9. Градиент температуры  $\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=R}$   
 в пластине при  $x = R$  в условиях ОИКС  
 ( $R=5 \cdot 10^{-3}$  м,  $q_0 = 1980$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\tau_{\text{нар}}=15$  с;  $\tau_{\text{ц}}=$   
 $60$  с;  $\mu^*=921$  м<sup>-1</sup>;  $\alpha = 50$  Вт/(м<sup>2</sup> К);  $\beta_c =0,054$   
 м/с;  $i = 1,416 \cdot 10^{-6}$  кг/(м<sup>2</sup> с)).

Рис. 10. Сравнение расчетной (1) и экспериментальной (2) кривых сушки семян лука репчатого.



Расчетное время сушки при сушке семян лука от начального влагосодержания 48% до конечного 15% составляло 38,3 мин, а опытное – 40 мин. Относительная ошибка расчета времени сушки в первом и во втором случае составляла 4 %. Из полученной изотермы десорбции влаги для лука репчатого рассчитан относительный коэффициент термодиффузии  $\delta_t$ . Это позво-

лило оценить вклад термовлагопроводности по отношению к потоку массопроводности при осциллирующей ИК-сушке, который оказался равным 5%. Следовательно, в инженерном расчете кинетики осциллирующей ИК-сушки термовлагопроводность можно не учитывать.

Показано, что применение осциллирующего ИК-энергоподвода за счет сокращения количества посевного материала дает экономический эффект на стадии послеуборочной сушки семян лука репчатого сорта «Штутгартен ризен» 26 881 руб. на 100 кг семян, а на стадии стимуляции перед посевом - 40 133 руб. на 100 кг семян.

#### Закключение и выводы по работе

1. В результате проведенных исследований показано, что целесообразно использовать ОИКТ не только для послеуборочной сушки семян овощных культур, но и для стимуляции семян перед высевом.
2. ОИКТ наиболее эффективна для жизнеспособных семян с пониженными посевными качествами (семян лука репчатого, огурца и др).
3. Наибольший стимулирующий эффект при ОИКТ достигается при предварительном замачивании семян в воде. Такая обработка рекомендуется в качестве предпосевной операции. Следует замачивать семена 10 мин, а подвергать ОИКТ 40 мин при  $t_{\min}=34^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max}=40^{\circ}\text{C}$ . Для семян лука репчатого сорта «Штутгартен ризен» энергия прорастания возрастает на 72%, а всхожесть – на 66 %.
4. Стимулирующий эффект имеет место также при ОИКТ сухих семян, хотя он ниже, чем у увлажненных. ОИКТ сухих семян рекомендуется для застарелых семян, долго хранящихся на складе, в качестве их предпродажной обработки.
6. Математически сформулирована и аналитически решена задача взаимосвязанного тепломассопереноса для пластины (слоя) в условиях электромагнитной сушки (ИК-сушки, сушки токами высокой и сверхвысокой частоты). Показана адекватность математической модели реальному процессу. Проведено компьютерное моделирование ОИКТ, показана целесообразность его применения для выбора режимных параметров процесса.
7. Предложен инженерный метод расчета кинетики ИК-сушки с использованием найденного решения. Получены данные по коэффициентам массопроводности и равновесному влагосодержанию ряда семян, необходимые для расчета.
8. Показано, что при осциллирующей ИК-сушки у поверхности материала возникает отрицательный температурный градиент. Он вызывает поток термовла-

гопроводности, который интенсифицирует процесс – в отличие от конвективной сушки. Численно проанализирован этот эффект.

9. Даны рекомендации по аппаратурному оформлению ОИКТ. Показано, что ее применение за счет сокращения количества посевного материала дает экономический эффект на стадии послеуборочной сушки семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» 26 881 руб. на 100 кг семян, а на стадии стимуляции перед посевом - 40 133 руб. на 100 кг семян.

10. Способ ОИКТ семян успешно апробирован в лаборатории «НИИ овощеводства защищенного грунта» (г. Москва), на что имеется акт испытаний. Способ осциллирующей инфракрасной термообработки семян используется в учебном процессе ФГБОУ ВПО МГАУ на кафедре «Теплотехника и энергообеспечение предприятий» при преподавании дисциплины «Тепломассообменное оборудование предприятий».

**Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях**

**В изданиях, предусмотренных перечнем ВАК**

1. Зуев, Н.А. Исследование энергии прорастания и всхожести семян горчицы при сушке импульсным ИК-способом / Н.А. Зуев, С.П. Рудобашта, Е.Ю. Зотова, Г.А. Зуева // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ имени В.П. Горячкина. Серия «Агроинженерия». 2011. №2(47). – С.7-10.

2. Рудобашта, С.П. Тепломассоперенос при сушке в осциллирующем электромагнитном поле / С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов, Н.А. Зуев // Теоретические основы химической технологии. 2011, Т. 45, № 6.- С. 641-647.

3. Зуев, Н.А. Стимуляция семян путем импульсной инфракрасной сушки / Н.А. Зуев, С.П. Рудобашта, Е.Ю. Зотова, Г.А. Зуева // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. №5.- С. 27-29.

**В периодической печати**

4. Рудобашта, С.П. Математическое моделирование импульсной инфракрасной сушки-стимуляции семян и аппаратурное оформление процесса / С.П. Рудобашта, Г.А.Зуева, Н. А . Зуев // Czasopismo Techniczne. Mechanica. z. 2-M/2012 (ROK 109) ISSN 0011-4561, ISSUE 6, year 109. Materiały X Międzynarodowa Konferencja Naukowa “Teoretyczne i Eksperymentalne Podstawy Budowy Aparatury. Польша. Краков. 2012.- С. 385-394.

5. Рудобашта, С.П. Математическая модель теплообмена в процессе радиационно-конвективной сушки семян при периодическом действии ИК-излучателей / С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов, Н.А. Зуев // Сб.тр. Четвертой межд. научно-практич. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка, термовлажностная обработка материалов), СЭТТ-2011», Москва. 2011. – С.121-125.

6. Зуев, Н.А. Стимуляция семян горчицы и лука, высушенных ИК-способом // Сб. тезисов докл. междунар. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Ресурсоэнергосберегающие технологии и оборудование». Киев. Национальный технич. ун-т. Украины. 2011. С.61-62.

7. Зуев, Н.А. Совмещенный процесс сушки и стимуляции семян с помощью импульсного инфракрасного излучения / Н.А. Зуев, С.П. Рудобашта, Г.А.Зуева // Пленарные доклады и тезисы секционных сообщений международной научно-практической конференции «Инновационные энергоресурсосберегающие технологии». Москва. 2012.- С.78-80.

8. Рудобашта, С.П. Математическое моделирование осциллирующей инфракрасной сушки и стимуляции семян / С.П. Рудобашта, Г.А.Зуева, Н.А. Зуев // Пленарные доклады и тезисы секционных сообщений международной научно-практической конференции «Инновационные энергоресурсосберегающие технологии». Москва. 2012.- С. 10-21.

9. Зуев Н.А. Комбинированный процесс ИК-сушки и стимуляции семян сельскохозяйственных культур // Пленарные доклады и тезисы секционных сообщений международной научно-практической конференции «Инновационные энергоресурсосберегающие технологии». Москва. 2012.- С. 22-23.

**Условные обозначения:**

$A$  – коэффициент поглощения, безразмерный;  $a$  – коэффициент температуропроводности материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $c$  – массовая теплоёмкость материала,  $\text{Дж}/(\text{кг К})$ ;  $i$  – интенсивность сушки пластины,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{с})$ ;  $k$  – коэффициент массопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $P$  – общее давление парогазовой смеси в аппарате, Па;  $q_0$  – плотность потока лучистой энергии, падающего на пластину,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $R$  – толщина пластины (слоя), м;  $r^*$  – теплота парообразования, включая теплоту десорбции влаги,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $t$ ,  $T$  – температура, соответственно  $^{\circ}\text{C}$  и  $\text{K}$ ;  $\bar{t}$  – среднеобъемная температура пластины (слоя),  $^{\circ}\text{C}$ ;  $u$ ,  $\bar{u}$  – локальное и среднее по объему пластины (слоя) влагосодержание, соответственно,  $\text{кг}/(\text{кг сухого материала})$ ;  $v$  – скорость обдува пластины (слоя),  $\text{м}/\text{с}$ ;  $x$  – декартова координата м;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{К})$ ;  $\beta_c$  – коэффициент массоотдачи, отнесённый к разности концентраций  $C_c$ ,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\Delta t$  – температурный гистерезис,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta_t$  – относительный коэффициент термовлагопроводности,  $\text{K}^{-1}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала,  $\text{Вт}/(\text{м К})$ ;  $\mu^*$  – коэффициент экстинкции,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\mu^*$  – коэффициент экстинкции,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\rho$ ,  $\rho_0$  – плотность влажного и абсолютно сухого материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\tau$  – время, с;  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %.

**Индексы:** з – замачивание; н – начальный; п – поверхность семян; с – сушильный агент; ср – средний; т – термообработка; min – минимальный; max – максимальный.

**Аббревиатуры:** В – всхожесть, % ; ИК – инфракрасный; ОИКТ – осциллирующая ИК- термообработка; ЭП – энергия прорастания, %.

Подписано к печати 24.02.2013

Формат 60×84/16.

Печать трафаретная

Усл.-печ. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ №

Отпечатано в издательском центре

ФГБОУ ВПО МГАУ

127550, Москва, Тимирязевская, 58.