

На правах рукописи

КАРИМОВ ХАСАН ТАЛХИЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ВАКУУМНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ
СУШКИ ЗЕРНА ЯЧМЕНЯ**

Специальность 05.20.01 – технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2019

Работа выполнена на кафедре механики и инженерной графики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ)

Научный руководитель: **Масалимов Ильгам Хамбалович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики и инженерной графики

Официальные оппоненты: **Щитов Сергей Васильевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортно-энергетических средств и механизации АПК федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Карпенко Галина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 года в __ часов на заседании диссертационного совета Д 999.177.03 при ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ, ФГБОУ ВО Казанский ГАУ, по адресу: 450001, г Уфа, ул. 50 лет Октября, 34, ауд. 259/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ и на сайте <https://www.bsau.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2019 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н, профессор

Мударисов
Салават Гумерович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Климатические условия значительной части территории Российской Федерации не позволяют убрать урожай зерновых культур при кондиционной влажности. В отдельные годы доля зерна, подлежащего сушке, достигает 80 %. Для этих целей используют разнообразные по типу и способу действия сушильные установки.

Большинство методов сушки сопряжено со значительным термическим и механическим воздействием, в связи с чем зерно ячменя теряет свою жизнеспособность и продовольственные качества при производстве солода. Поэтому конструкции установок для сушки зерна ячменя целесообразно рассматривать в аспекте снижения на него температурного и механического воздействия, повышения скорости сушки и производительности, снижения энергетических и капитальных затрат, экологической нагрузки на окружающую среду.

В настоящее время возможности по улучшению традиционных способов сушки зерна и конструкций сушильных установок практически исчерпаны. Наиболее перспективным является направление разработки комбинированных способов сушки, в которых значительно больше имеется резервов для повышения эффективности процесса сушки зерновых культур. Имеются многочисленные подтверждения эффективности применения нескольких способов сушки в различных сочетаниях, например: применению контактной сушки с конвекцией, СВЧ-излучение в сочетании с конвективной сушкой, микроволновая сушка с вакуумной. Причем возможны варианты, когда эти способы сушки протекают в сушильной установке одновременно или чередуются, сменяя друг друга. Одним из перспективных направлений является разработка сушильной установки, обеспечивающей инфракрасный нагрев в вакууме.

Работа выполнена по плану НИОКР (рег. № 01.201.060414) и на средства гранта Республики Башкортостан молодым ученым и молодежным научным коллективам (2018 год).

Степень разработанности темы. Теоретическое и экспериментальное обоснование совместного применения инфракрасного нагрева с созданием вакуума для сушки зерна сельскохозяйственных культур не достаточно изучено. Вследствие этого, математическое обоснование процесса сушки зерна в вакуумной инфракрасной установке является актуальным направлением.

Цель исследования. Повышение эффективности сушки зерна ячменя путем совместного применения вакуума и инфракрасного излучения.

Объект исследования. Технологический процесс сушки зерна ячменя в вакуумной инфракрасной сушильной установке.

Предмет исследования. Технологические параметры процесса вакуумной инфракрасной сушки зерна ячменя и конструктивные параметры установки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель процесса сушки в вакуумной инфракрасной установке, с учетом совместного воздействия на зерно инфракрасного нагрева и вакуума.

- обоснованы оптимальные режимы сушки зерна в вакуумной инфракрасной сушильной установке из условия минимизации энергопотребления.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработана вакуумная инфракрасная сушильная установка для сушки зерна ячменя и методика определения оптимальных режимов сушки зерна ячменя для семенных и продовольственных целей.

Использование в производстве разработанной вакуумной инфракрасной сушильной установки позволяет получить экономический эффект на 1 тонну высушенного зерна в размере 558,7 рублей по сравнению с сушильной установкой СЗ-0,3.

Методика исследований включала основные положения теории сушки влажных материалов, аналитической механики, методы математического анализа, компьютерного моделирования, планирования многофакторного эксперимента и математической статистики, оптимизации целевой функции.

Экспериментальные исследования базировались на общепринятых методиках и проводились в лабораторных и производственных условиях.

Обработка результатов производилась с помощью компьютерных программных продуктов: MS Excel, Mathcad, Statu, прикладной программы АРМ WinMachine и специально разработанного программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель кинетики процесса сушки зерна ячменя в вакуумной инфракрасной сушильной установке;

- экспериментальная оценка влияния режимов сушки на показатели качества зерна ячменя;

- обоснование конструктивных и режимных параметров вакуумной инфракрасной сушильной установки.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований подтверждается адекватностью полученных математических моделей. При экспериментах применялось современное сертифицированное оборудование и приборы, прошедшие поверку.

Основные научные положения доложены и обсуждены на всероссийских и международных научных конференциях Челябинского ГАА (г. Челябинск, 2013 г.), Башкирского ГАУ (г. Уфа, 2012-2016 гг.), Мордовского ГУ им. Н.П. Огарева (г. Саранск, 2013 г.), Воронежского ГАУ им. Императора Петра I (г. Воронеж, 2013 г.), Курганского ГСХА имени Т.С. Мальцева (с. Лесниково, 2014 г.), Уральского ГАУ (г. Екатеринбург, 2015 г.), Ульяновского ГАУ (г. Ульяновск, 2016 г.).

Конструкция разработанной сушильной установки демонстрировалась на выставках и форумах: Всероссийском стартап-туре 2015 г. Уфа, 2015 г. (диплом финалиста), XVIII Российской агропромышленной выставке «Золотая осень» г. Москва, 2016 г. (серебряная медаль), XXVIII Международной специализированной выставке «Агрокомплекс 2018», г. Уфа (золотая медаль, диплом 1 степени).

По теме диссертационной работы в составе коллектива молодых ученых кафедры механики и инженерной графики Башкирского ГАУ, был выигран грант Республики Башкортостан молодым ученым и молодежным научным коллективам (Уфа, 2018 год).

Разработанная вакуумная инфракрасная сушильная установка прошла производственные испытания и была внедрена в производство в ООО МТС «Илишевская» Илишевского района Республики Башкортостан.

Личный вклад автора в проведенные исследования. Уточнена классификация существующих технологий и средств механизации сушки зерна сельскохозяйственных культур, выполнены экспериментальные исследования процесса сушки зерна ячменя инфракрасным излучением в вакууме, разработана экспериментальная вакуумная инфракрасная сушильная установка, выполнено теоретическое обоснование ее конструктивных параметров, проведены исследования установки в лабораторных и производственных условиях.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 36 работах, в том числе две статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, одна статья в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus. Новизна технических решений защищена патентом на изобретение и патентом на полезную модель. Общий объем опубликованных работ составляет 7,6 п.л., из них принадлежат автору – 3,5 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, библиографического списка из 124 наименований и приложений на 34 страницах. Основной текст изложен на 124 страницах, содержит 46 рисунков и 22 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность работы, сформулированы цель, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса сушки зерна сельскохозяйственных культур» рассмотрена актуальность сушки зерна сельскохозяйственных культур.

Выполненный обзор существующих методов сушки и конструкций сушильных установок показал, что совершенствование технологий и средств механизации сушки зерна должно быть направлено на уменьшение энергозатрат, повышение производительности и повышение качества готового продукта.

Основой всех исследований процесса сушки влажных материалов явились труды Лыкова А.В. и Гинзбурга А.С. Вопросы сушки продуктов растительного происхождения рассмотрены в работах Авдеева А.В., Анискина В.И., Атаназевича В.И., Баума А.Е., Галкина А.Д., Гержоя А.П., Данилова Д.Ю., Егорова Г.А., Жидко В.И., Карпенко Г.В., Крауспа В.Р., Курдюмова В.И., Лебедева П.Д., Лурье М.Ю., Малина Н.И., Мельника Б.Е., Павлушина А.А., Птицына С.Д., Пункова С.П., Резчикова В.А., Сажина Б.С., Сакуна В.А., Теленгамора М.А., Трисвятского Л.А., Уколова В.С., Щитова С.В., Чумакова В.Г. и других исследователей.

Основные теоретические и экспериментальные исследования, связанные с изучением особенностей инфракрасного нагрева и вакуумной сушки, были проведены А.Ф. Аминовым, В.А. Афонькиной, М.А. Брамсоным, С. В. Зверевым, Б.П. Камовниковым, В.Н. Карповым, И.И. Макарычевым, И.С. Моисеевой, А.В. Нетушилом, Ю.М. Плаксиным, И.А. Роговым и другими авторами.

Обзор по теме диссертации позволил установить, что для повышения эф-

фektivности сушки зерна ячменя требуется интенсифицировать внутренний и внешний влагопереносы. Предпочтительным способом интенсификации десорбции влаги при сушке зерна ячменя является совместное применение инфракрасного излучения и вакуума.

Анализ рассматриваемой проблемы позволил сформулировать следующие **задачи исследований:**

1. Разработать математическую модель процесса сушки зерна ячменя и обосновать ее режимы в вакуумной инфракрасной сушильной установке;
2. Обосновать конструктивные параметры вакуумной инфракрасной сушильной установки;
3. Разработать экспериментальную вакуумную инфракрасную сушильную установку и определить основные технологические параметры процесса сушки зерна ячменя;
4. Провести технико-экономическую оценку разработанной сушильной установки.

Во второй главе «**Теоретическое обоснование конструкции, параметров и режимов работы вакуумной инфракрасной сушильной установки**», на основе литературных источников и конструкции существующих сушильных установок была разработана технологическая схема сушки зерна ячменя (рисунок 1).

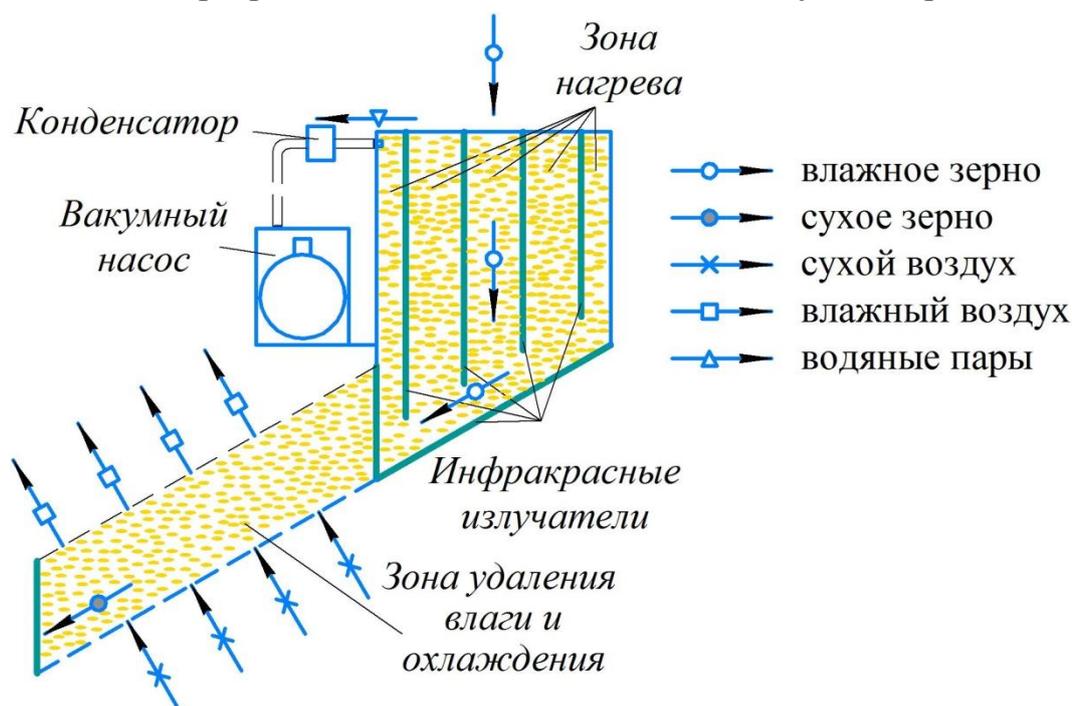


Рисунок 1 – Технологическая схема сушки зерна ячменя

Влажное зерно поступает в сушильную камеру, где подвергается нагреву инфракрасными излучателями, затем создается вакуум путем откачки воздуха и водяных паров вакуумным насосом.

Далее в зоне охлаждения зерно охлаждается до температуры окружающей среды, в это время из него удаляется влага и высушенное зерно идет на выгрузку. На этапе проектирования сушильной установки была разработана расчетная схема (рисунок 2).

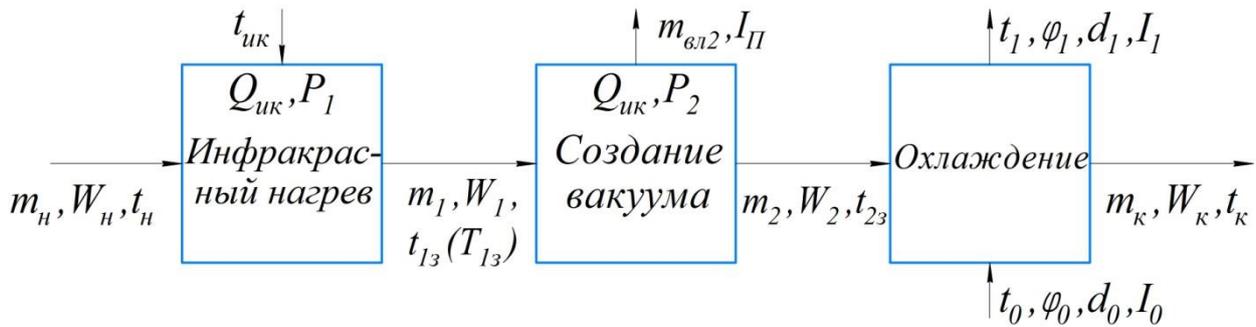


Рисунок 2 – Расчетная схема сушильной установки

Сырое зерно с массой m_n (кг), влажностью W_n (%) и температурой t_n (°C) засыпают в сушильную камеру. В зоне предварительного нагрева зерно нагревают инфракрасными излучателями $Q_{ук}$ при атмосферном давлении $P_1 = P_a$, в результате чего температура зерна повышается с t_n до t_{13} . Далее включается вакуумный насос и в зоне нагрева создается вакуум, т.е. $P_2 < P_a$. В это время из сушильной камеры удаляется влага в виде водяных паров в количестве $m_{вл1}$. Масса и влажность зерна уменьшаются с m_1 до m_2 и с W_1 до W_2 . Температура зерна t_{13} и t_{23} ограничивается максимальным допустимым значением. В зоне охлаждения зерно продувается атмосферным воздухом с температурой t_0 , относительной влажностью φ_0 , влагосодержанием d_0 , и энтальпией I_0 . При продувке зерна, происходит охлаждение, и из него испаряется влага. На выходе из камеры охлаждения воздух характеризуется параметрами t_1 , φ_1 , d_1 , I_1 . Температура зерна снижается с t_{23} до t_k , влажность с W_2 до W_k , а масса с m_2 до m_k .

Согласно разработанной схеме, процесс сушки состоит из трех этапов: первый – инфракрасный нагрев, второй – создание вакуума с дальнейшим нагревом и третий – охлаждение материала атмосферным воздухом.

Для обоснования параметров первого этапа рассмотрим теплообмен, который происходит при инфракрасном излучении.

Количество поглощения инфракрасных излучений зерном находится согласно закону Бугера–Ламбера–Бера:

$$I_3 = E_n \cdot e^{(-k_\lambda \cdot (\Delta/2))}, \quad (1)$$

где I_3 – интенсивность инфракрасных лучей, прошедших слой зерна толщиной $\Delta/2$, Вт/м²;

Δ – расстояние между инфракрасными излучателями, мм;

E_n – интенсивность инфракрасных лучей на входе в слой зерна, Вт/м²;

k_λ – коэффициент ослабления луча находится по формуле, 1/мкм

$$k_\lambda = 4\pi k / \lambda, \quad (2)$$

где k – показатель поглощения;

λ – длина волны, мкм.

При определении излучательной способности зерна применяем закон Стефана–Больцмана:

$$E_3 = \varepsilon_3 \cdot C_0 \cdot (T_{13}/100)^4, \quad (3)$$

где ε_3 – коэффициент поглощения зерна;

C_0 – постоянная Стефана – Больцмана, 5,7 Вт/(м²·К⁴);

T_{13} – абсолютная температура зерна, К.

Согласно закону Киргофа

$$I_3 = E_3. \quad (4)$$

Или с учетом (1) и (3)

$$T_{13} = 100 \cdot \sqrt[4]{E_n \cdot e^{-(4\pi k/\lambda) \cdot (\Delta/2)} / (\varepsilon_3 \cdot C_0)}. \quad (5)$$

Согласно закону Стефана–Больцмана излучательная способность инфракрасного излучателя определяется

$$E_n = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot (T_n/100)^4, \quad (6)$$

где ε_n – коэффициент поглощения инфракрасного излучателя;

T_n – абсолютная температура инфракрасного излучателя, К.

Подставив выражение (6) в уравнение (5) получим расчетную формулу для определения температуры зерна в слое толщиной $\Delta/2$

$$T_{13} = 100 \cdot \sqrt[4]{(\varepsilon_n \cdot (T_n/100)^4) \cdot e^{-(4\pi k/\lambda) \cdot (\Delta/2)} / \varepsilon_3}. \quad (7)$$

На втором этапе продолжается нагрев материала и происходит создание вакуума, во время которой влага из внутренних слоев выходит наружу, а влага с поверхности материала испаряется и удаляется из сушильной камеры. Процесс сушки-испарения влаги с поверхности материала можно рассмотреть аналогично испарению воды со свободной поверхности

$$V_m = k_\beta (P_n - P_n), \quad (8)$$

где V_m – скорость испарения влаги в кг с 1 м^2 поверхности;

k_β – коэффициент влагообмена между поверхностью материала и окружающим агентом сушки, зависящим от значения и направления скорости движения агента сушки относительно материала, кг/(Н·ч);

P_n, P_n – парциальное давление водяного пара соответственно у поверхности материала и в окружающем агенте сушки, Па;

Анализ уравнения (8) показывает, что скорость сушки растет с увеличением разности парциальных давлений паров воды на поверхности материала и в агенте сушки $P_n - P_n$. Увеличение $P_n - P_n$ можно достичь за счет: а) роста P_n при повышении температуры нагрева влажного материала; б) уменьшения величины парциального давления P_n . Следовательно, скорость сушки можно увеличить путем повышения температуры высушиваемого материала до пределов, ограничиваемых его термоустойчивостью или создания вакуума в сушильной камере.

Мощность инфракрасных излучателей $Q_{ИК}$ определяется исходя из уравнения баланса тепла для второго этапа сушки:

$$Q_{ИК} = (m_2 c_2 t_{23} + Q_{ном.} \cdot \tau_2 - m_1 c_1 t_{13} + I_{\Pi} m_{\beta 12}) / \tau_2, \quad (9)$$

где $m_2 c_2 t_{23}$ – соответственно масса, удельная теплоемкость и температура зерна на выходе из сушильной камеры, кДж;

$Q_{ном.}$ – потери теплоты в окружающую среду, кВт;

τ_2 – время нагрева в вакууме, с;

$m_1 c_1 t_{13}$ – соответственно масса, удельная теплоемкость и температура зерна, перед вторым этапом, кДж;

$I_{\Pi} m_{\beta 12}$ – количество теплоты уходящей с водяными парами, кДж;

I_{Π} – энтальпия пара, кДж/кг;

$m_{\beta 1}$ – масса влаги удаляемой из сушильной камеры, определяется из уравнения материального баланса, кг;

$$m_{\text{вл}2} = m_1 (W_1 - W_2)/(100 - W_2). \quad (10)$$

На третьем этапе происходит продувка зерна атмосферным воздухом, что приводит к охлаждению зерна и удалению влаги из его поверхности.

Уравнение теплового баланса охладительной камеры:

$$L_x I_0 + c_{\text{вл}} (m_{\text{вл}3}/\tau_{\text{в}}) t_{23} + (m_{\text{к}}/\tau_{\text{в}}) \cdot c_{\text{к}} (t_{23} - t_{\text{к}}) = L_x I_1 + Q_{\text{o.ср.х}} \cdot 3600, \quad (11)$$

где $L_x I_0$ – количество тепла, поступающая с наружным воздухом, кДж/час;

$c_{\text{вл}} (m_{\text{вл}3}/\tau_{\text{в}}) t_{23}$ – количество тепла, поступающая с влагой зерна (которая затем испаряется в охладительной камере), кДж/час;

$c_{\text{вл}}$ – теплоемкость влаги, кДж/кг·°С;

$\tau_{\text{в}}$ – время охлаждения зерна и его выгрузки, час;

$(m_{\text{к}}/\tau_{\text{в}}) \cdot c_{\text{к}} (t_{23} - t_{\text{к}})$ – количество тепла, отдаваемое зерном, кДж/час;

$c_{\text{к}}$ – теплоемкость высушенного зерна, кДж/кг·°С;

$L_x I_1$ – количество тепла уходящая с использованным наружным воздухом, кДж/час;

$Q_{\text{o.ср.х}}$ – потери тепла в окружающую среду через поверхность стенок охладительной камеры, кВт;

$m_{\text{вл}3}$ – масса влаги, удаляемой из охладительной камеры, определяется из уравнения материального баланса, кг:

$$m_{\text{вл}3} = m_2 (W_2 - W_{\text{к}})/(100 - W_{\text{к}}). \quad (12)$$

Часовой расход сухого воздуха в охладительной камере определяется из уравнения баланса влаги

$$L_x = m_{\text{вл}3}/\tau_{\text{в}} \cdot 1000/(d_1 - d_0). \quad (13)$$

Исходя из допущения, что при всех прочих равных условиях (времени нагрева без вакуума τ_1 , в вакууме τ_2 , величины вакуума H) изменение влажности ΔW пропорционально исходной влажности материала $W_{\text{н}}$, принимаем:

$$\Delta W = W_{\text{н}} f(H, \tau_1, \tau_2, W_{\text{н}}), \quad (14)$$

Зависимость (14) положенная в основу математической модели кинетики сушки зерна ячменя, отражена в главе 4.

Оптимальные режимные параметры сушки зерна ячменя в вакуумной инфракрасной установке определялись из условия минимизации энергопотребления (кВт·ч) при обеспечении заданной конечной влажности зерна $W_{\text{к}}$:

$$\Sigma = [N_{\text{тр}} \tau_3 + N(\tau_{\text{н}1} + \tau_{\text{н}2} + k_{\tau_1} \tau_{k1} + k_{\tau_2} \tau_{k2}) + N_{\text{вн}} \tau_2 + N_{\text{в}} \tau_{\text{в}}]/60 \rightarrow \min, \quad (15)$$

где Σ – энергопотребление сушильной установкой, кВт·ч; $N_{\text{тр}}$ – мощность загрузочного транспортера, кВт; τ_3 – время загрузки зерна в сушильную камеру; N – общая мощность инфракрасных излучателей, кВт; $\tau_{\text{н}1}$, τ_{k1} , $\tau_{\text{н}2}$, τ_{k2} – время нагрева зерна до заданной максимальной температуры нагрева инфракрасных излучателей t_{max} и прерывистого режима работы инфракрасных излучателей для периодов сушки соответственно τ_1 и τ_2 , мин; k_{τ_1} , k_{τ_2} – доли времени работы инфракрасных излучателей в прерывистом режиме для периодов сушки соответственно τ_1 и τ_2 ; $N_{\text{вн}}$ – мощность на привод вакуумного насоса, кВт; $N_{\text{в}}$ – мощность на привод вентилятора, кВт; $\tau_{\text{в}}$ – время охлаждения зерна и его выгрузки.

Вышеприведенная математическая модель позволила определить: 1) диапазон расстояний между инфракрасными излучателями $\Delta = 45 \dots 55$ мм (формула 7), при котором не происходит перегревание зерна; 2) диапазон мощности ин-

фракрасных излучателей $Q_{ИК} = 2,8...8,6$ кВт (формула 9), зависящий от значения влагосъема, начальной влажности материала и производительности сушильной установки; 3) часовой расход сухого воздуха $L_x = 997...2991$ кг/час (формула 13), необходимый для удаления влаги и охлаждения зерна.

Согласно формуле 8 увеличить скорость сушки, не ухудшая семенные качества зерна, можно путем создания вакуума в сушильной камере.

Для минимизации энергопотребления сушильной установки необходимо произвести оптимизацию входных параметров по формуле (15).

Одним из основных факторов, влияющих на процесс сушки является масса зерна в сушильной камере, определяемой ее размерами.

Оптимальные геометрические размеры сушильной камеры a , b , h (рисунок 3) заданной вместимости V определим исходя из условия минимума стоимости камеры

$$C = C_M S_M \rho_M \delta + C_{нагр} S_{нагр} \rightarrow \min, \quad (16)$$

где C_M , $C_{нагр}$ – удельная стоимость соответственно камеры и инфракрасных излучателей, руб./кг и руб./м²; S_M , $S_{нагр}$ – площади соответственно стенок камеры и инфракрасных излучателей, м²; ρ_M – плотность металла, кг/м³; δ – толщина стенок камеры, м.

Пренебрегая толщиной инфракрасных излучателей и принимая во внимание, что $h = V/(a \cdot b)$;

$$x = a/\cos\alpha; \quad z = a/\Delta;$$

$$S_M = 2(a + b) \cdot h + a \cdot b + b \cdot x; \quad S_{нагр} = b \cdot (h - \Delta/\cos\alpha) \cdot z + b \cdot x,$$

условие (16) преобразуется к виду

$$C = C_M \rho_M \delta \{2V[1/b + 1/(z \cdot \Delta)] + z \cdot \Delta \cdot b(1 + 1/\cos\alpha)\} + C_{нагр} V/\Delta \rightarrow \min. \quad (17)$$

Аналитическим решением задачи (17) получены следующие оптимальные размеры бункера:

$$a = b = \sqrt[3]{2V/(1 + 1/\cos\alpha)}; \quad h = V/a^2. \quad (18)$$

Поскольку количество инфракрасных излучателей z может быть только целым числом, возможный ряд объемов бункера с оптимальными размерами в зависимости от их числа и принятого расстояния Δ между излучателями определяется по формуле

$$V = (z \cdot \Delta)^3 (1 + 1/\cos\alpha)/2, \quad (19)$$

т.е. оптимальные объемы бункера находятся в кубической зависимости от числа z инфракрасных излучателей.

Необходимый для самотечной выгрузки зерна угол наклона днища бункера выбираем из условия

$$\alpha > \chi, \quad (20)$$

где χ – угол трения высушиваемого материала с днищем камеры.

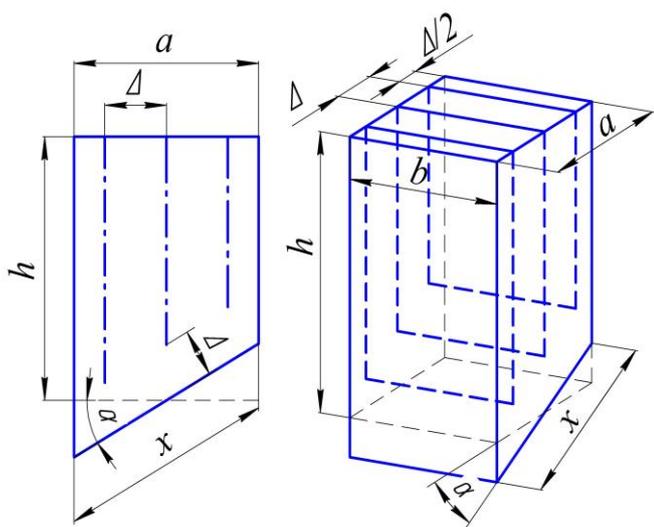


Рисунок 3 – Расчетная схема сушильной камеры

С учетом вышеприведенных расчетов была разработана конструкция вакуумной инфракрасной сушильной установки, совмещающей в себе инфракрасный нагрев с вакуумом (рисунок 4).

Процесс сушки осуществляется следующим образом. Влажный материал, поступает из загрузочного устройства через люк 3 в загрузочный бункер 2, который представляет собой сушильную камеру, разделенную на секции посредством пленочных инфракрасных излучателей 12 с длиной волны 7,4 мкм. Программируемый контроллер блока управления 7 обрабатывает сигнал, полученный с датчиков температуры и влажности, установленных в сушильной камере 2, и включает инфракрасные излучатели 8 на необходимую температуру нагрева. Затем включается вакуумный насос 6, который создает вакуум в сушильной камере 2. По истечении заданного времени нагрева материал при открытой заслонке 9 направляется в камеру охлаждения 4, где подвергается конвективной сушке и охлаждению благодаря активному воздушному обдуву вентилятором 5. В результате этого пыль, легкие семена сорных растений и влага выдуваются наружу через окно 13, а высушенный материал по наклонному дну камеры 4 направляется на выгрузку.

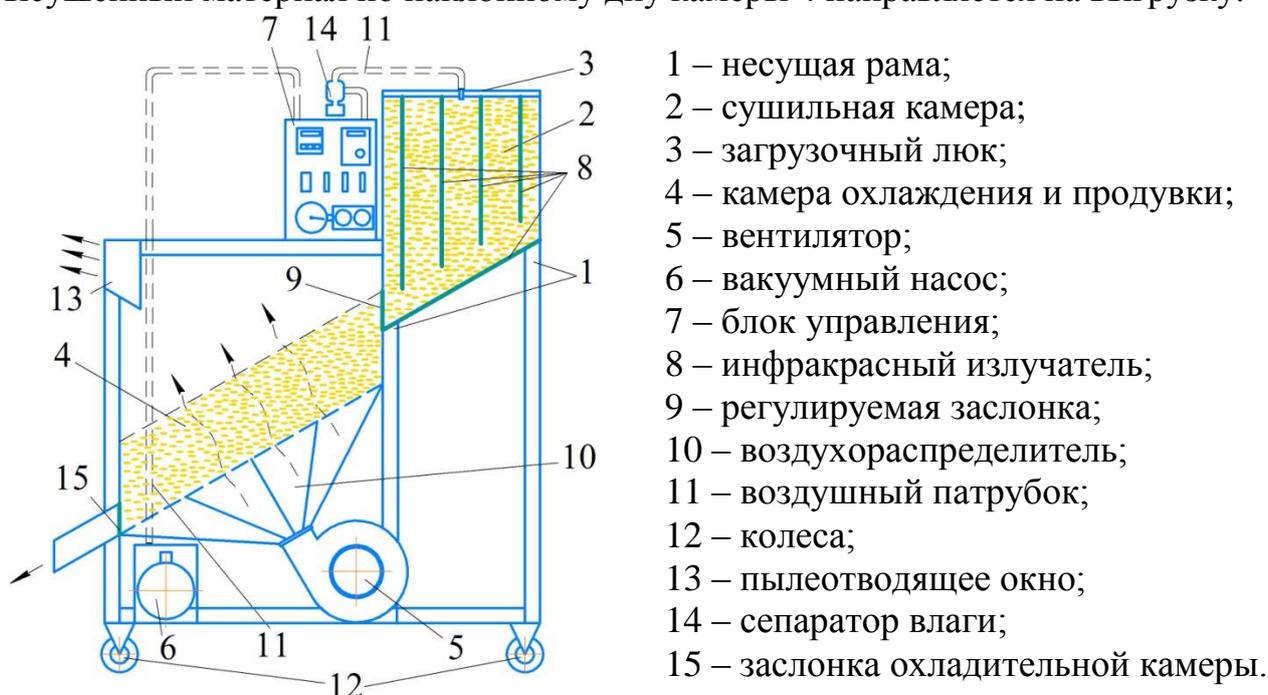


Рисунок 4 – Схема вакуумной инфракрасной сушильной установки

Таким образом, во второй главе приведена математическая модель позволяющая определить режимные параметры, разрабатываемой сушильной установки. Теоретически обоснованы: расстояние между инфракрасными излучателями Δ ; мощность инфракрасных излучателей $Q_{ИК}$; удельный расход сухого воздуха l_x , геометрические параметры сушильной камеры: длина камеры a , ширина камеры b , высота камеры h , количество инфракрасных излучателей z , в зависимости от задаваемого объема сушильной камеры. Разработана конструкция вакуумной инфракрасной сушильной установки.

В третьей главе «Методика исследования процесса сушки зерна ячменя с использованием инфракрасного излучения в вакууме» описаны методы и приемы экспериментальных исследований. Приведены описания контрольно-

измерительных приборов и оборудования, а также методики определения энергозатрат и влияния основных параметров на кинетику сушки и динамику нагрева зерна в разрабатываемой сушильной установке (рисунок 5).



1 – исходное зерно; 2 – влагомер зерна; 3 – сушильная камера, оборудованная инфракрасными излучателями; 4 – блок управления; 5 – корпус установки; 6 – вентилятор; 7 – выгрузное устройство; 8 – высушенное зерно; 9 – персональный компьютер для обработки данных.

Рисунок 5 – Лабораторная установка для сушки зерна ячменя

В ходе проведенных исследований применялись одно- и многофакторные методики с использованием пакетов прикладных программ MS Excel, Statu.

В четвертой главе «**Результаты экспериментальных исследований сушки зерна ячменя с использованием инфракрасного излучения в вакууме**» представлены результаты обработки экспериментальных исследований по оценке достоверности теоретических выводов и уточнению обоснования основных конструктивных и режимных параметров.

Одним из основных показателей эффективности сушильной установки является качество высушенного продукта. Для исключения случаев перегревания зерна, необходимо обосновать и определить расстояние между инфракрасными

излучателями Δ . На лабораторной установке был проведен эксперимент, по определению температуры зерна ячменя по середине слоя в зависимости от расстояния между инфракрасными излучателями.

График на рисунке 6 позволяет сравнить результаты экспериментальных и теоретических (формула 7) исследований.

Как следует из рисунка 6, задаваясь максимальной возможной температурой нагрева зерна t_{13} , можно определить оптимальное расстояние между инфракрасными излучателями Δ .

Эффективность работы проектируемой вакуумной инфракрасной установки зависит от принятых параметров режимов сушки, а именно максимальной температуры нагрева зерна, величины вакуума, времени нагрева и продувки.

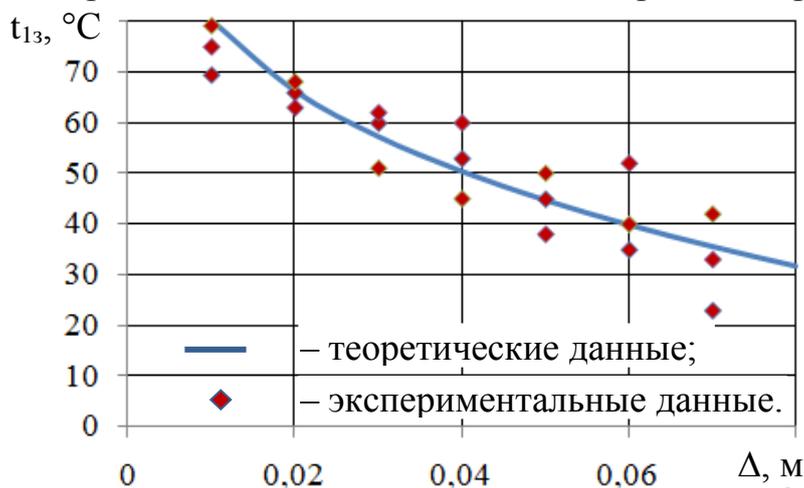


Рисунок 6 Зависимость температуры зерна ячменя от расстояния между инфракрасными излучателями

Было принято во внимание, что на первом этапе наибольший влагосъем обеспечивается при максимальном нагреве материала (формула 8), однако повышение температуры инфракрасного нагрева может привести к повреждению зародыша зерна. Поэтому в основу выбора режимов сушки заложена нулевая степень денатурации белка. На жизнеспособность зерна после сушки, в наибольшей степени влияют: максимальная температура нагрева поверхности инфракрасного излучателя ($t_{ук}$), время нагрева (τ), исходная влажность зерна (W_H). При этом основывались на сведениях о повышении термоустойчивости зерна при снижении его влажности и продолжительности воздействия высоких температур.

Статистическая обработка результатов проведенного эксперимента по плану Песочинского с трехкратной повторностью показала, что время нагрева в диапазоне 5 – 30 мин и начальная влажность зерна в диапазоне 16 – 22 % не оказывают существенного влияния на термоустойчивость зерна ячменя. После исключения незначимых коэффициентов регрессии получена следующая регрессионная зависимость всхожести зерна ячменя G_3 от раскодированного значения $t_{ук}$

$$G_3 = -294,15 + 11,76t_{ук} - 0,089t_{ук}^2 \quad (21)$$

Данная регрессионная зависимость адекватно описывает экспериментальные данные с уровнем значимости 0,05, ей соответствует коэффициент детерминации $R^2 = 0,84$, и представлена графически на рисунке 8.

Из рисунка 7 видно, что существенное снижение всхожести зерна ячменя происходит при нагреве выше 70 °С, поэтому в дальнейшем это значение принято в качестве максимальной температуры нагрева поверхности инфракрасных излучателей, обеспечивающей максимальную интенсивность сушки при отсутствии денатурации белка.

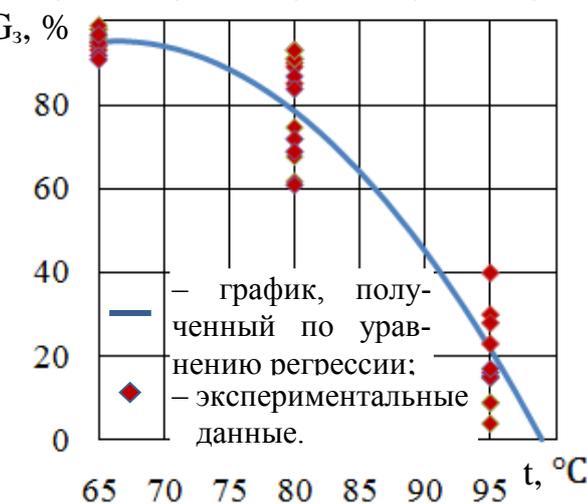


Рисунок 7 – Зависимость всхожести зерна ячменя от температуры нагрева поверхности инфракрасных излучателей

В эксперименте по уточнению оптимального режима сушки зерна ячменя приняты следующие факторы и их границы варьирования: величина вакуума H (20 кПа; 80 кПа); время нагрева без вакуума (время предварительного нагрева) τ_1 (0; 60 мин); время нагрева с вакуумом τ_2 (6 мин; 60 мин); начальная влажность зерна W_H (16 %; 22 %). Выходным параметром являлась величина влагосъёма ΔW . Четырехфакторный эксперимент проводился по плану Бокса-Бенкена с четырехкратной повторностью опытов.

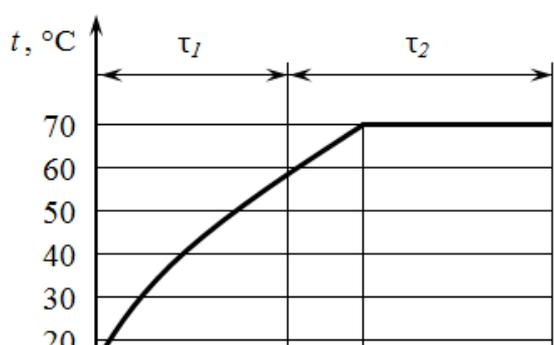


Рисунок 8 – Диаграмма процесса нагрева зерна ячменя в сушильной установке

При проведении опытов температура нагрева поверхности инфракрасных излучателей поддерживалась с помощью терморегулятора не выше $t_{ук} = 70$ °С.

Время нагрева инфракрасных излучателей, характеризуемый ростом темпе-

ратуры до значения $t_{ук}$, составляет τ_H . В этот период инфракрасные излучатели работают на полную мощность. В дальнейшем, в течение времени τ_K благодаря терморегулятору инфракрасные излучатели работают в прерывистом режиме и поддерживают постоянную температуру поверхности инфракрасных излучателей $t_{ук}$. В зависимости от принятых времен τ_1 и τ_2 максимальную температуру $t_{ук}$ инфракрасные излучатели могут достигнуть как в период времени τ_1 , так и τ_2 (рисунке 8).

В результате статистической обработки экспериментальных данных в соответствии с (14) получено следующее уравнение регрессии

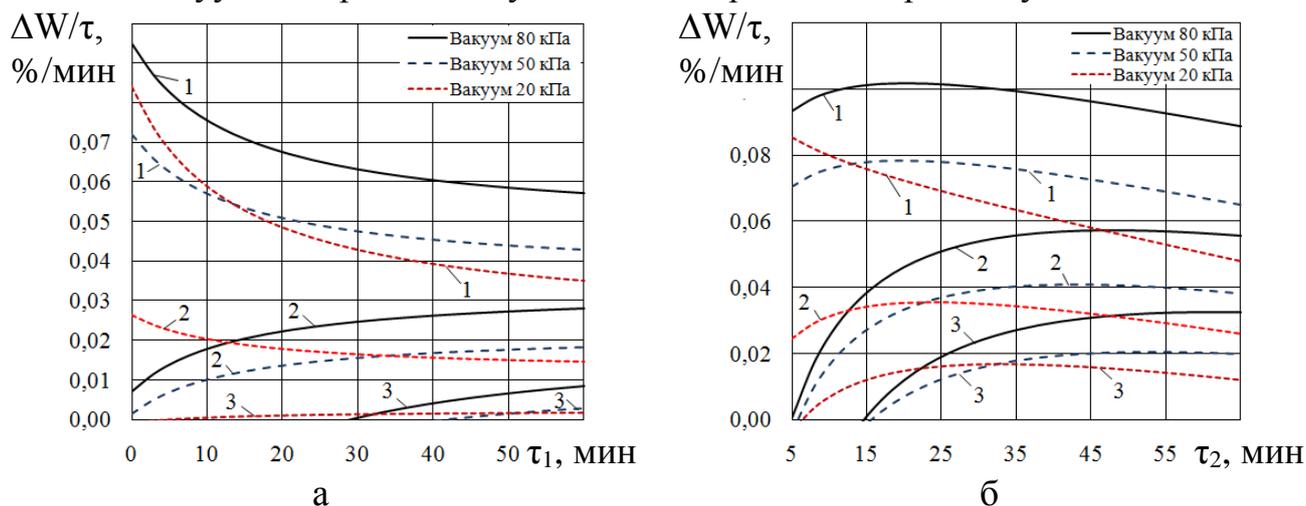
$$\Delta W/W_H = b_1 + b_2 H + b_3 \tau_1 + b_4 \tau_2 + b_5 W_H + b_6 \tau_2^2 + b_7 H \tau_1 + b_8 H \tau_2 + b_9 \tau_1 W_H + b_{10} H W_H + b_{11} \tau_2 W_H + b_{12} H^2 + b_{13} W_H^2 \quad (22)$$

здесь коэффициенты регрессии: $b_1 = 0,1985$; $b_2 = -0,003944$; $b_3 = -0,002695$; $b_4 = -0,0005455$; $b_5 = -0,02336$; $b_6 = -0,0000213$; $b_7 = 0,00001857$; $b_8 = 0,00003635$; $b_9 = 0,00015467$; $b_{10} = 0,0001181$; $b_{11} = 0,0001419$; $b_{12} = 0,0000124$; $b_{13} = 0,0007684$.

Коэффициент множественной корреляции составил $R = 0,979$. Математическая модель (22) адекватна для всей области эксперимента и позволяет исследовать влияние режима сушки на параметры оптимизации.

На рисунках 9 показаны полученные зависимости средней скорости сушки $\Delta W/\tau$ от исследуемых факторов W_H, H, τ_1, τ_2 , где $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_B$ – общее время сушки.

Анализ этих зависимостей показал, что средняя скорость сушки зерна ячменя в вакуумной инфракрасной сушильной установке тем выше, чем больше исходная влажность зерна. W_H Более интенсивная сушка происходит при сокращении времени нагрева зерна без вакуума τ_1 и определенном значении времени нагрева зерна в вакууме τ_2 . Дальнейшее увеличение времени τ_2 приводит к снижению средней скорости сушки вследствие уменьшения влажности зерна. Увеличение вакуума H приводит к увеличению средней скорости сушки.



1 – $W_H = 22\%$; 2 – $W_H = 19\%$; 3 – $W_H = 16\%$

Рисунок 9 – Зависимость средней скорости сушки: а) от времени нагрева без вакуума τ_1 , величины вакуума H при $\tau_2 = 0$ и начальной влажности зерна %; б) от времени нагрева в вакууме τ_2 и величины вакуума H при времени предварительного нагрева $\tau_1 = 30$ минут и при начальной влажности зерна ячменя

Установлено, что увеличение величины вакуума, времени предварительного нагрева и времени нагрева в вакууме приводит к существенной интенсификации процесса сушки. Однако, чрезмерное увеличение этих параметров приводит к увеличению энергетических затрат.

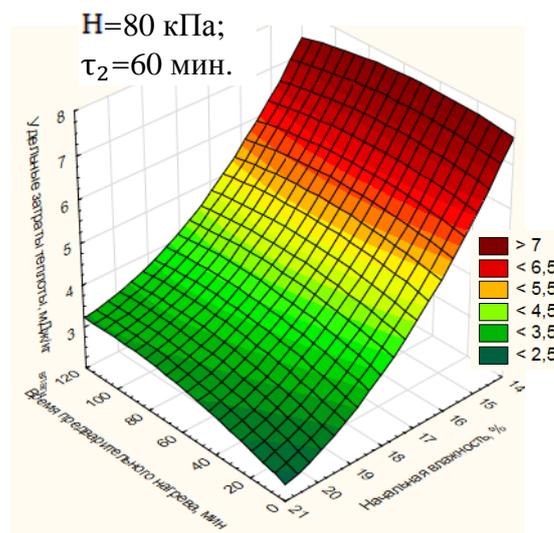
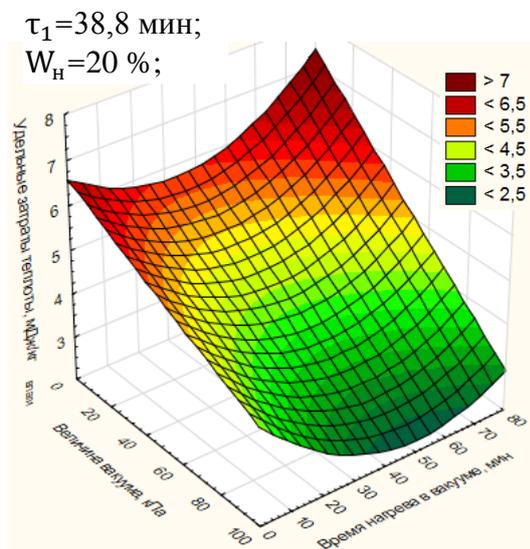
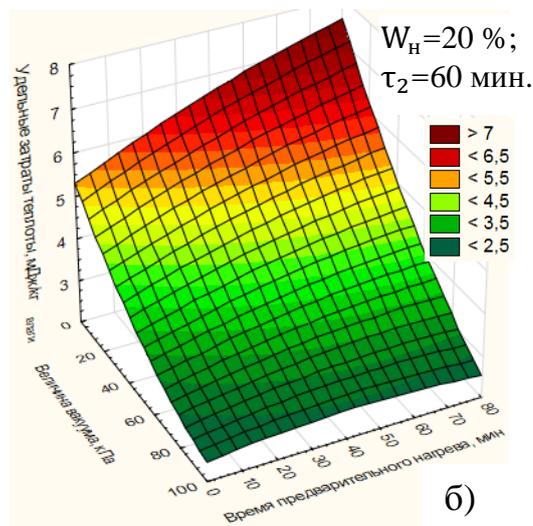
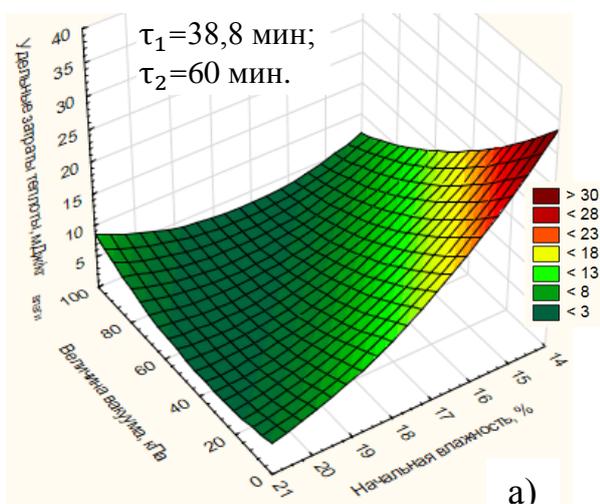
Для оценки эффективности процесса сушки в качестве критерия оптимизации были определены затраты теплоты на испарение 1 кг влаги из зерна. Результаты экспериментов по определению оптимальных режимов сушки зерна ячменя обрабатывали в программе Statistica 6.0. По итогам обработок были получены уравнения регрессии, показывающие: совместное влияние величины вакуума и начальной влажности зерна на удельные затраты теплоты (23) (рисунок 10а); совместное влияние величины вакуума и времени предварительного нагрева зерна ячменя на удельные затраты теплоты (24) (рисунок 10б); совместное влияние величины вакуума и времени нагрева зерна ячменя в вакууме на удельные затраты теплоты (25) (рисунок 10в); совместное влияние времени предварительного нагрева зерна ячменя и начальной влажности на удельные затраты теплоты (26) (рисунок 10г) :

$$Q_{y\partial} = 202,316 - 0,996H - 17,371W_H + 0,001H^2 + 0,043HW_H + 0,379W_H^2 \quad (23)$$

$$Q_{y\partial} = 5,306 - 0,048H + 0,037\tau_1 + 0,0002H^2 - 0,0003H\tau_1 + 0,0001\tau_1^2 \quad (24)$$

$$Q_{y\partial} = 6,576 - 0,024H - 0,052\tau_2 + 0,00001H^2 - 0,0003H\tau_2 + 0,0008\tau_2^2 \quad (25)$$

$$Q_{y\partial} = 39,122 - 0,011\tau_1 - 3,258W_H - 0,00007\tau_1^2 + 0,001\tau_1W_H + 0,072W_H^2 \quad (26)$$



в)

г)

Рисунок 10 – Поверхности отклика от взаимодействия: а) начальной влажности зерна ячменя и величины вакуума; б) времени предварительного нагрева зерна ячменя и величины вакуума; в) времени нагрева зерна ячменя в вакууме и величины вакуума; г) времени предварительного нагрева зерна ячменя и начальной влажности

Во время эксперимента фиксировались время нагрева поверхности инфракрасных излучателей до $t_{ук} = 70$ °С (время срабатывания терморегулятора) и температуру излучателей в конце периода τ_2 , когда она не достигала 70 °С. Это позволило получить следующее уравнение регрессии:

$$\tau_n = -10,02 + 0,74t + 0,1925P - 0,0115W_n P - 0,000983P^2; R^2=0,906 \quad (27)$$

где t – температура нагрева поверхности инфракрасных излучателей в период работы излучателей на полную мощность, °С; P – абсолютное давление в сушильной камере, кПа, которое связано с атмосферным давлением P_a и величиной вакуума $P = P_a - H$.

Для определения доли времени работы инфракрасных излучателей в прерывистом режиме k_τ был проведен дополнительный эксперимент, заключающийся в фиксации времени работы и паузы инфракрасных излучателей. Статистическая обработка результатов эксперимента позволила получить уравнение регрессии

$$k_\tau = -0,8323 + 0,1177W_n + 0,00189H - 0,001984W_n^2; R^2=0,980 \quad (28)$$

В результате расчетов по формуле (15) с учетом (22), (27) и (28) получили оптимальные режимы сушки зерна ячменя из условия минимума энергозатрат.

Поскольку при произвольных значениях W_n, H, τ_1, τ_2 не обеспечивается заданная конечная влажность зерна W и не достигаются экстремумы функций, представленных на рисунках 9 и 10 целесообразно решать задачу оптимизации параметров H, τ_1, τ_2 , обеспечивающих максимум средней скорости сушки зерна различной влажности W_n при условии достижения заданной конечной влажности $W = 14$ %. Это позволит уменьшить общее время сушки зерна и увеличить производительность сушильной установки.

Оптимизация времени сушки зерна с ограничением $W = 14$ % производилась с помощью надстройки “Поиск решения” MS Excel. Результатами расчетов являются оптимальные режимы сушки: Так, например, для сушки зерна с начальной влажностью $W_n = 20$ % требуется $\tau_1 = 39$ минут и $\tau_2 = 60$ минут при вакууме 80 кПа, а при вакууме 70 кПа уже требуется $\tau_1 = 58$ минут. При начальной влажности зерна $W_n = 16$ % для достижения $W = 14$ % требуется время $\tau_1 = 0$, а $\tau_2 = 54$ минуты при вакууме 80 кПа.

Полученные режимы сушки, полностью совпадают с режимами, найденными из условия максимума средней скорости сушки зерна. Это объясняется тем, что в балансе энергозатрат большая часть приходится на инфракрасное излучение и поэтому сокращение времени нагрева приводит к уменьшению общих затрат энергии.

При оптимальном режиме сушки ячменя на семенные и технические цели от 20 до 14 % влажности в испытываемой вакуумной инфракрасной сушильной установке удельное потребление энергии составило 3,14 МДж на 1 кг испаренной влаги, что в 1,4 раза ниже, чем в сушильной установке контактно-конвективного типа и в 1,8 раза ниже, чем в сушилках конвективного типа.

Средняя скорость сушки от 20 % до 14 % влажности зерна ячменя в оптимальном режиме составила 0,056 %/мин. При сушке зерна меньшей начальной влажности средняя скорость сушки уменьшается и при $W_n = 18\%$ составляет 0,042 %/мин, а при $W_n = 15\%$ – 0,022 %/мин. Данная тенденция согласуется с известными результатами исследований сушки зерна сельскохозяйственных культур.

В соответствии с полученными режимными параметрами производительность сушильной установки вместимостью сушильной камеры 0,23 м³ при сушке зерна от влажности 20 – 15 % до кондиционной влажности 14 % составляет 100 – 250 кг высушенного зерна в час.

В пятой главе «Исследование процесса сушки зерна ячменя в производственных условиях и оценка его экономической эффективности» приведены результаты производственных испытаний установки (рисунок 11).

Во время испытаний производилась сушка зерна ячменя Михайловского сорта, с начальной влажностью 18...22%. Производительность установки составила до 250 кг/час.



Рисунок 11 – Производственные испытания в условиях ООО МТС «Илишевская» Илишевского района Республики Башкортостан

выпускаемой зерносушилкой С-0,3. Годовой экономический эффект от применения разработанной вакуумной инфракрасной сушильной установки составил 111735,3 рублей или 558,7 руб. на 1 тонну высушенного зерна ячменя. Окупаемость сушильной установки составляет 2,5 года.

Апробация показала высокую эффективность вакуумной инфракрасной сушильной установки. Также установлены в сравнении с альтернативными методами сушки следующие преимущества: высокое экологическое состояние продукта, сокращение времени обработки, сокращение энергозатрат, малые габариты и возможность круглогодичного использования.

Приведено сравнение технико-экономических показателей эффективности сушки зерна ячменя в вакуумной инфракрасной сушильной установке с серийно

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель процесса сушки зерна ячменя инфракрасным излучением в вакууме, которая позволила исследовать кинетику сушки и влияние вакуума, времени сушки и начальной влажности зерна на влаговсём. Математическая модель позволила определить расстояние между инфракрасными излучателями $\Delta = 45 \dots 55$ мм и мощность инфракрасных излучателей $Q_{ИК} = 2,8 \dots 8,6$ кВт, при которых не происходит перегревание зерна; часовой расход сухого воздуха $L_x = 997 \dots 2991$ кг/час, необходимая для удаления влаги и охлаждения зерна до рациональной температуры хранения, при мощности вентилятора 3 кВт.

2. Обоснованы оптимальные конструктивные параметры сушильной камеры в зависимости от её вместимости. При вместимости сушильной камеры $0,23$ м³ её длина и ширина равны $0,6$ м, его средняя высота – $0,65$ м, число вертикальных инфракрасных излучателей – 12 , угол наклона днища камеры – 30° .

3. Разработана экспериментальная вакуумная инфракрасная сушильная установка, включающая сушильную камеру, разделенную на секции посредством пленочных инфракрасных излучателей, вакуумный насос и камеру удаления влаги и охлаждения зерна.

По результатам экспериментальных исследований определены основные технологические параметры процесса сушки зерна ячменя: максимальная температура нагрева поверхности инфракрасных излучателей, не превышающая 70 °С; рациональное расстояние между инфракрасными излучателями, при удельной мощности 800Вт/м^2 – 5 см. Установлено, что при сушке зерна ячменя влажностью не более 20 % в вакуумной инфракрасной сушильной установке кондиционная влажность 14 % достигается за один цикл. В зависимости от исходной влажности зерна ячменя определены оптимальные режимы сушки: при начальной влажности $W_n = 20\%$, вакуум $H = 80$ кПа, время предварительного нагрева $\tau_1 = 38,8$ мин. и время нагрева в вакууме $\tau_2 = 60$ мин.

4. Разработанная вакуумная инфракрасная сушильная установка и технология сушки зерна ячменя прошли производственные испытания в хозяйстве ООО МТС «Илишевская» Илишевского района Республики Башкортостан.

Экономический эффект от внедрения вакуумной инфракрасной сушильной установки составляет $558,7$ рублей на 1 тонну высушенного зерна ячменя, годовой экономический эффект составил $111735,3$ рублей. Срок окупаемости предлагаемой установки составляет $2,5$ года.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании и эксплуатации вакуумных инфракрасных сушильных установок с различной производительностью.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Дальнейшие исследования по совершенствованию процесса сушки зерна сельскохозяйственных культур могут вестись в направлении углубления теоретических исследований, совершенствования конструкции сушильной установки,

например, в направлении совмещения процесса сушки с последующим процессом сортирования, а также разработки других комбинированных способов сушки.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Каримов, Х.Т. Оценка способов сушки семян ячменя / Масалимов И.Х., Каримов Х.Т. // Вестник российской академии сельскохозяйственных наук. – 2014, №3. – С. 71-72.

2. Каримов, Х.Т. Исследование режимов сушки семян подсолнечника в СВЧ-установке непрерывного действия / Ганеев И.Р., Каримов Х.Т., Масалимов И.Х. // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2017, №2. – С. 67-71.

Публикации в изданиях, входящих в Scopus

3. Karimov Khasan. Reasoning Barley Grain Drying Modes for Vacuum-Infrared Drying Machines / Vladimir Martynov, Ildar Gabitov, Khasan Karimov, Ilgam Masalimov, Valeri Permyakov, Ildar Ganeev, Inur Saitov and Bulat Saitov. // Journal of Engineering and Applied Sciences 13. – 2018. Special Issue 11. P.8803-8811.

Патенты

4. Пат. № 142281 Российская Федерация, МПК F26B 9/06 Устройство для сушки сыпучих материалов / Каримов Х.Т., Ганеев И.Р., Масалимов И.Х., Пермяков В.Н.; заявители и патентообладатели: Каримов Х.Т., Ганеев И.Р., Масалимов И.Х., Пермяков В.Н.– 2014101726/06; заявл. 21.01.2014; опубл. 27.06.2014, Бюл. №18 – 3 с.

5. Пат. № 2577909 Российская Федерация, МПК F26B 20/00, F26B 9/09, B07B 4/02 Устройство для сушки и сортировки сыпучих материалов / Каримов Х.Т., Ганеев И.Р., Масалимов И.Х., Пермяков В.Н., Файзрахманов Ш.Ф.; заявители и патентообладатели Башкирский ГАУ, Каримов Х.Т., Ганеев И.Р. – 2015107785/06; заявл. 05.03.2015; опубл. 20.03.2016, Бюл. №8 – 5 с.

Публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций опубликовано 31 статей, важнейшими из которых являются:

6. Каримов, Х.Т. Выбор способа сушки зерна / Х.Т. Каримов, Б.Н. Саитов // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2012. – С. 94-96.

7. Каримов, Х.Т. Перспективный способ сушки сельскохозяйственных культур / Х.Т. Каримов, И.Х. Масалимов, И.Р. Ганеев // Материалы LII Международной научно технической конференции. – Челябинск: Челябинская ГАА, 2013. – С. 47-49.

8. Каримов, Х.Т. Сушка зерна инфракрасными лучами / Х.Т. Каримов, И.Х. Масалимов // Мат. IX Международной научно-практической конференции «Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции». – Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2013. – С. 280-282.

9. Каримов, Х.Т. Сушка зерна с использованием вакуума / Х.Т. Каримов, И.Х. Масалимов // Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития АПК». – Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. – С. 341-342.

10. Каримов, Х.Т. Ремонт и эксплуатация сушильных установок / Х.Т. Каримов, И.С. Тастиев // Материалы научно-практической конференции. Ремонт. Восстановление. Реновация. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. – С. 70-72.

11. Каримов, Х.Т. Вакуумная сушилка периодического действия с ИК-излучением / Х.Т. Каримов, И.Х. Масалимов // Материалы II Международной научно – практической конференции, посвященная 100-летию ВГАУ и 20-летию образования факультета Технологии и товароведения. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2013. – С. 55-57.

12. Каримов, Х.Т. Перспективный способ сушки семян ячменя / Х.Т. Каримов, И.Х. Масалимов // Мат. Всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные основы

научно-технической и технологической модернизации АПК» ФОНТиТМ-АПК-13. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. – С. 151-153.

13. Каримов, Х.Т. Нагрев зерна ИК излучением / Х.Т. Каримов, М.М. Баймуратов // Материалы международной научно-практической конференции «Совершенствование конструкции, эксплуатации и технического сервиса автотракторной и сельскохозяйственной техники». – Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. – С. 166-169.

14. Каримов, Х.Т. Вакуумно-инфракрасная сушка зерна ячменя / Х.Т. Каримов, И.Х. Масалимов, В.Н. Пермяков // Материалы Международной научно-практической конференции. – Уфа: Гилем, Башк. Энцикл., 2014. – С. 125-130.

15. Каримов, Х.Т. Прочностной расчет бункера вакуумной инфракрасной сушильной установки в среде arm winmachine / Х.Т. Каримов, И.Х. Масалимов, В.Н. Пермяков // Материалы международной научно-практической конференции в рамках XXIV Международной специализированной выставки «Агрокомплекс – 2014». – Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. – С. 68-73.

Подписано в печать _____. Формат бумаги 60×84¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,0. Бумага офсетная

Печать трафаретная. Гарнитура «Таймс». Заказ 376. Тираж 130 экз.

Типография ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»
450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34.