

На правах рукописи



НЕСТЕРОВ Дмитрий Андреевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ
ЗЕРНА ПРОСА В СВЧ-АППАРАТЕ
С ЗАКРУЧЕННЫМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Специальность 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых
производств»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Научный руководитель – заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор
Антипов Сергей Тихонович
(ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»)

Официальные оппоненты – **Попов Виктор Михайлович**
заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»,
профессор кафедры «Электротехника, теплотехника
и гидравлика»
Шевцов Сергей Александрович
доктор технических наук,
Воронежский институт – филиал «Ивановская по-
жарно-спасательная академия ГПС МЧС России»,
профессор кафедры «Пожарная безопасность объек-
тов защиты»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань.

Защита состоится «24» мая 2018 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим присылать учёному секретарю совета Д 212.035.01.

Автореферат размещен на сайтах Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <https://vak3.ed.gov.ru> и ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «23» марта 2018 г.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети «Интернет» на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «1» марта 2018 г. Автореферат разослан «16» апреля 2018 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук
Д 212.035.01



Л.Н. Фролова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В государственной программе развития АПК РФ на 2013-2020 годы одной из целей является повышение конкурентоспособности российской растениеводческой продукции на внутреннем и внешнем рынках. Для достижения этой цели необходима комплексная переработка отечественных сырьевых источников с максимальным сохранением исходной пищевой и биологической ценности и создание на их основе продуктов питания.

Сушка зерна проса является сложным технологическим процессом. Используемые в настоящее время для сушки проса шахтные и барабанные сушилки при высоких удельных энергозатратах не обеспечивают требуемой производительности и качества готового продукта.

При рассмотрении основных направлений совершенствования процесса сушки дисперсных продуктов нами был сделан вывод о том, что качественная и эффективная сушка зерна проса может осуществляться в аппаратах с активным гидродинамическим режимом и применением комбинированного энергоподвода.

Диссертационная работа выполнялась в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» на кафедре «Машины и аппараты пищевых производств» в соответствии с тематикой НИР кафедры.

Цель диссертационной работы – научное обеспечение процесса сушки зерна проса в аппарате с закрученными потоками теплоносителя и СВЧ-энергоподводом, а также определение рациональных технологических режимов сушки зерна проса и разработка новой конструкции сушильного аппарата, схемы автоматического управления и технологической схемы переработки зерна проса.

В соответствии с целью решались следующие задачи:

1. Изучение зерна проса как объекта исследования, определение физико-механических, теплофизических и электрофизических характеристик изучаемого сырья.

2. Проведение дифференциально-термического анализа

зерна проса для выявления температурных интервалов, соответствующих удалению влаги с различной формой связи.

3. Изучение кинетических закономерностей процесса сушки зерна проса в СВЧ-аппарате с закрученными потоками теплоносителя.

4. Определение рациональных режимов установки для сушки проса.

5. Разработка математической модели процесса сушки зерна проса.

6. Разработка новой конструкции сушильного аппарата, схемы автоматического управления и технологической схемы комплексной переработки зерна проса.

7. Провести промышленные испытания разработанной конструкции сушильного аппарата.

Научная новизна. Изучены кинетические закономерности процесса сушки зерна проса, определены формы связи влаги в продукте.

Определены формы связи влаги в зерне проса, а также физико-механические, теплофизические и электрофизические параметры исследуемого продукта.

Разработана статистическая модель для исследования взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс сушки зерна проса в СВЧ-аппарате с закрученными потоками теплоносителя.

Создана математическая модель процесса СВЧ-сушки зерна проса во взвешенно-закрученном слое, обладающая высокой детализацией и высокой адекватностью, базирующейся на общепринятых методах моделирования и физико-математического описания.

Практическая значимость работы. Произведена комплексная оценка теплообменных процессов при сушке зерна проса.

Разработана новая конструкция сушильного аппарата, позволяющая значительно ускорить процесс сушки зерна проса по сравнению с существующими традиционными способами сушки в шахтных и барабанных сушилках.

Новизна технических решений подтверждена патентами РФ

№ 2544406, 2547345 и свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615868, 2016612405.

Сформулированные теоретические положения и практические выводы могут быть использованы при организации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на пищевых предприятиях, отраслевых НИИ и в учебном процессе.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследований зерна проса как объекта сушки;
- экспериментальные и теоретические данные по физико-механическим, электрофизическим и теплофизическим характеристикам, а также результаты дифференциально-термического анализа;
- результаты экспериментальных исследований кинетических закономерностей процесса сушки зерна проса в СВЧ-аппарате с закрученными потоками теплоносителя;
- математическая модель движения зерен и сушки проса;
- технологическая линия комплексной переработки зерна проса;
- конструкция аппарата для сушки зерна проса с закрученными потоками теплоносителя и СВЧ-энергоподводом;
- способ автоматического управления процессом сушки зерна проса в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены и обсуждены на научных конференциях в Воронежском государственном университете инженерных технологий (с 2013 по 2017); Москве (2013); Уфе (2014); Тамбове (2016).

Результаты работы экспонировались на II Международной выставке изобретений и инноваций (2016), по итогам которой работа награждена сертификатом.

Результаты работы использовались в учебном процессе в качестве материалов курсового и дипломного проектирования.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК, получено 2 патента Российской Федерации и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 225 страницах машинописного текста, содержит 92 рисунка и 29 таблиц. Список литературы включает 104 наименования. Приложения к диссертации представлены на 29 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении охарактеризовано современное состояние переработки зерна проса, обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе систематизированы литературные данные о современном состоянии теории, техники и технологии переработки зерна проса, отмечены основные направления совершенствования технологии и сушильных установок. Приведена общая классификация сушилок, представлены конструкции сушилок с закрученными потоками, выпускаемые в России и за рубежом. Уделено внимание анализу особенностей процесса тепло- и массообмена при сушке влажных материалов в аппаратах с закрученными потоками теплоносителя.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обоснован выбор объекта исследования, определены методы решения поставленных задач.

Во второй главе изложено описание экспериментальных исследований некоторых характеристик зерна проса как объекта сушки.

С целью определения температур фазовых переходов, физического состояния влаги, оценки энергии связи влаги с материалом был проведен дифференциальный термографический анализ материала. В диапазоне 303...323 К происходит нагрев и удаление физико-механически связанной влаги (капиллярной влаги), имеющей невысокую энергию связи с продуктом. При температурах 323...418 К осуществляется десорбция осмотической влаги зерна проса. Интервал 418...513 К характеризуется удалением адсорбционной влаги.

Нагревание исследуемых образцов до 513 К и выше приводит к экзотермическому эффекту – кроме удаления связанной влаги начинается термическое разложение продукта.

Для глубокого изучения процесса сушки зерна проса и создания методик расчета необходимо знание теплофизических величин.

По методу нестационарного теплового режима определены коэффициенты температуропроводности α , коэффициент теплопроводности λ и удельная теплоемкость c в интервале влажности 15,6...22,0 % и при температуре исследуемого образца 293...373 К. На всем интервале влажности величины составляют диапазон: α – от $7,78 \cdot 10^{-8}$ до $11,246 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, λ – от 0,195 до 0,316 Вт/(кг·К), c – от 1,478 до 2,742 кДж/(кг·К).

В третьей главе рассматриваются особенности кинетики сушки зерна проса во взвешенно–закрученном слое.

Из опытных данных, полученных на экспериментальной установке, следует, что при сушке зерна проса наблюдаются незначительные периоды прогрева, постоянной скорости сушки, основным является период падающей скорости сушки.

Кинетические закономерности процесса сушки зерна проса и термограммы в зависимости от температуры представлены на рисунках 1 и 2.

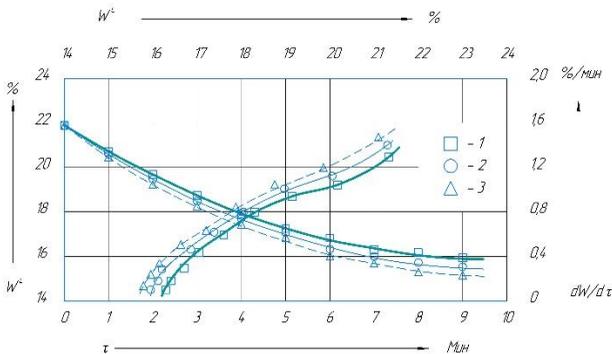


Рисунок 1 – Кривые сушки и скорости сушки зерна проса при $W^c=22\%$, $V_{oc}/V_{\bar{t}}=1,5$ и $P_{свч}=550$ Вт в зависимости от температуры: 1 – $T=333$ К; 2 – $T=325$ К; 3 – $T=318$ К

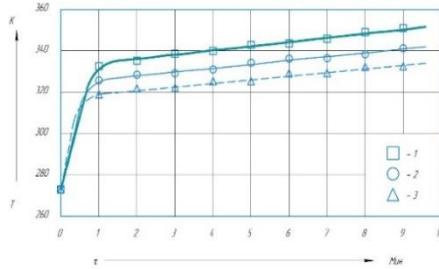


Рисунок 2 – Термограммы зерна проса при $W^c=22\%$, $V_{oc}/V_\tau=1,5$ и $P_{СВЧ}=550$ Вт в зависимости от температуры:
1 – $T=333$ К; 2 – $T=325$ К; 3 – $T=318$ К

Анализ полученных закономерностей свидетельствует о том, что из продукта, в основной своей массе, происходит удаление адсорбционной влаги. Также можно утверждать, что температура в выбранном диапазоне исследования 318–333 К оказывает на процесс сушки пропорциональное влияние, и с увеличением температуры процесс сушки протекает более интенсивно.

Влияние отношения скорости осевого и тангенциального потоков теплоносителя на кинетику процесса сушки зерна проса представлены на рисунках 3 и 4.

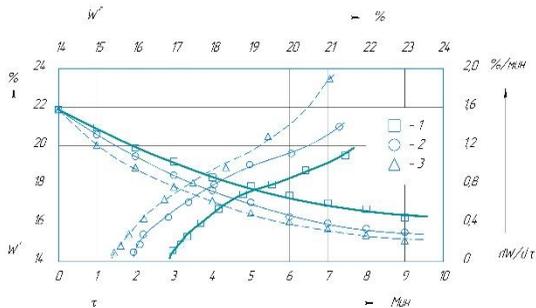


Рисунок 3 – Кривые сушки и скорости сушки зерна проса при $W^c=22\%$, $T=325$ К и $P_{СВЧ}=550$ Вт в зависимости от отношения осевого и тангенциального потоков теплоносителя:
1 – $V_{oc}/V_\tau=1,0$; 2 – $V_{oc}/V_\tau=1,5$; 3 – $V_{oc}/V_\tau=2,0$

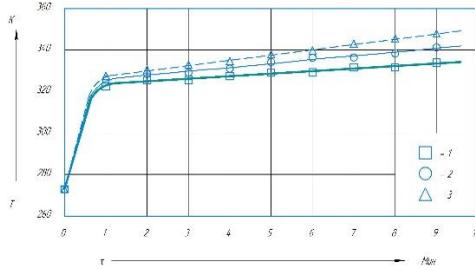


Рисунок 4 – Термограммы зерна проса при $W^c=22\%$, $T=325\text{ К}$ и $P_{\text{СВЧ}}=550\text{ Вт}$ в зависимости от отношения осевого и тангенциального потоков теплоносителя: 1 – $V_{oc}/V_{\tau}=2,0$; 2 – $V_{oc}/V_{\tau}=1,5$; 3 – $V_{oc}/V_{\tau}=1,0$

Из кривых видно, что соотношение осевого и тангенциального потоков оказывает значительное влияние на протекание процесса. Это выражается в следующем: при отношении $V_{oc}/V_{\tau} = 1$ зерно проса достигает требуемой влажности через 8 мин, но при этом не происходит уноса зерна из сушильной камеры. При $V_{oc}/V_{\tau}=2$ наблюдается обратное явление, т.е. происходит унос зерна проса из сушильной камеры без достижения требуемой влажности.

Кинетические закономерности сушки зерна проса в зависимости от подводимой СВЧ-мощности представлены на рисунке 5. Термограмма процесса представлена на рисунке 6.

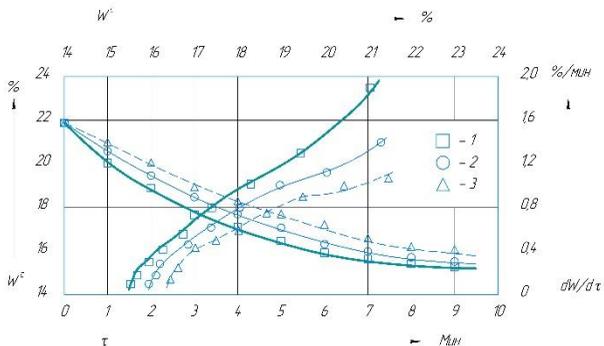


Рисунок 5 – Кривые сушки и скорости сушки зерна проса при $W^c=22\%$, $T=325\text{ К}$ и $V_{oc}/V_{\tau}=1,5$ в зависимости от СВЧ-мощности: 1 – $P_{\text{СВЧ}}=1000\text{ Вт}$; 2 – $P_{\text{СВЧ}}=550\text{ Вт}$; 3 – $P_{\text{СВЧ}}=150\text{ Вт}$

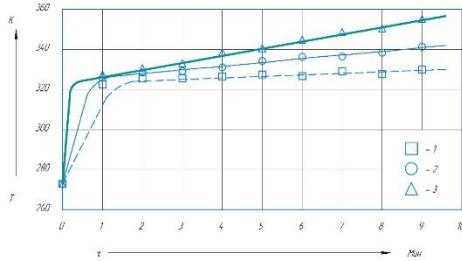


Рисунок 6 – Термограммы зерна проса при $W^e=22\%$, $T=325\text{ K}$ и $V_{oc}/V_t=1,5$ в зависимости от СВЧ-мощности:
 1 – $P_{\text{СВЧ}}=1000\text{ Вт}$; 2 – $P_{\text{СВЧ}}=550\text{ Вт}$; 3 – $P_{\text{СВЧ}}=150\text{ Вт}$

С понижением влажности проса происходит уменьшение коэффициента диэлектрических потерь, что приводит к снижению количества теплоты, генерируемой в продукте, однако согласно закону Джоуля-Ленца эффективность преобразования энергии переменного электромагнитного поля (ЭМП) в теплоту пропорциональна квадрату напряженности ЭМП, поэтому увеличение подводимой СВЧ-мощности способствует увеличению КПД процесса трансформации СВЧ-энергии.

Для исследования взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс конвективной сушки зерна проса во взвешенно-закрученном слое, были применены математические методы планирования эксперимента.

В качестве основных факторов, влияющих на процесс конвективной сушки зерна проса, были выбраны в соответствующих интервалах: x_1 – температура воздуха, подаваемого в сушилку, К, (318,0...333,0), x_2 – отношение скорости осевого потока воздуха, подаваемого в сушильную установку к скорости тангенциального потока воздуха, (1,0...2,0), x_3 – начальная влажность зерна проса, (16,4...22,0) %, x_4 – удельная мощность СВЧ-энергоподвода, кВт/кг, (0,02...0,14).

Выбор интервалов изменения факторов обусловлен технологическими условиями процесса сушки проса, конструктивными характеристиками сушильной установки.

Критериями оценки влияния различных факторов на процесс сушки зерна проса были выбраны: Y_1 – конечная влажность зерна

проса по отношению к абсолютно сухому веществу %; Y_2 – напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге, кг_{вл}/(м³·ч).

Для исследования процесса сушки проса было применено планирование эксперимента и выбран план Бокса на кубе 2⁴ второго порядка.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие данный процесс под влиянием исследуемых факторов:

$$Y_1 = 11,828 + 0,732x_1 - 0,668x_2 + 1,567x_3 - 0,842x_4 - 0,0695x_1x_2 + 0,042x_1x_3 + 0,104x_1x_4 + 0,067x_2x_3 - 0,203x_2x_4 - 1,027x_3x_4 + 0,137x_1^2 + 0,053x_2^2 + 0,304x_3^2 + 0,012x_4^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 29,432 + 3,304x_1 + 5,939x_2 - 0,281x_3 - 1,203x_4 + 0,442x_1x_2 + 0,543x_1x_3 + 0,543x_1x_4 - 0,537x_2x_3 - 7,716x_2x_4 + 10,001x_3x_4 + 0,029x_1^2 - 0,926x_2^2 + 0,512x_3^2 - 0,304x_4^2. \quad (2)$$

По регрессионным моделям (1), (2) поставлена и решена задача оптимизации, которая была сформулирована следующим образом: найти такие режимы работы сушильной установки, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров обеспечивали минимальную конечную влажность зерна проса по отношению к абсолютно сухому веществу и максимальное значение напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге.

Поиск оптимальных режимов процесса сушки зерна проса показал, что для выходных параметров в качестве оптимальных могут быть приняты следующие интервалы значений: температура воздуха, подаваемого в сушилку, – 325...327 К, отношение скорости осевого потока воздуха, подаваемого в сушильную установку к скорости тангенциального потока воздуха, – 1,27...1,55, начальная влажность зерна проса – 19,17...20,51 %, удельная мощность СВЧ-энергоподвода – 0,09...0,11, кВт/кг.

В четвертой главе приведена математическая модель процесса СВЧ-сушки зерен проса во взвешенно-закрученном слое, обладающая высокой детализацией и высокой адекватностью, базирующейся на общепринятых методах моделирования и физико-математического описания.

Уравнения движения зерен проса составляются на основе второго закона Ньютона:

$$\begin{cases}
 m_e \frac{d^2 x_i}{dt^2} = k_m (v_{xm}(x_i, y_i, z_i) - v_{xi}) + \begin{cases} c_{II} \left(\frac{d_c}{2} - r_{i-II} \right) \frac{(x_i - x_{i-II})}{r_{i-II}} + k_{II} \left(r_{i-II} - \frac{d_c}{2} \right) v_{xi}, & r_{i-II} < \frac{d_c}{2}; \\
 0, & r_{i-II} \geq \frac{d_c}{2}; \end{cases} \\
 + \sum_{j=I}^{N_i} \begin{cases} c(d_c - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + k_e (r_{ij} - d_c) (v_{xi} - v_{xj}), & r_{ij} < d_c; \\
 0, & r_{ij} \geq d_c; \end{cases} \\
 m_e \frac{d^2 y_i}{dt^2} = k_m (v_{ym}(x_i, y_i, z_i) - v_{yi}) + \begin{cases} c_{II} \left(\frac{d_c}{2} - r_{i-II} \right) \frac{(y_i - y_{i-II})}{r_{i-II}} + k_{II} \left(r_{i-II} - \frac{d_c}{2} \right) v_{yi}, & r_{i-II} < \frac{d_c}{2}; \\
 0, & r_{i-II} \geq \frac{d_c}{2}; \end{cases} \\
 + \sum_{j=I}^{N_i} \begin{cases} c(d_c - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + k_e (r_{ij} - d_c) (v_{yi} - v_{yj}), & r_{ij} < d_c; \\
 0, & r_{ij} \geq d_c; \end{cases} \\
 m_e \frac{d^2 z_i}{dt^2} = k_m (v_{zm}(x_i, y_i, z_i) - v_{zi}) + \begin{cases} c_{II} \left(\frac{d_c}{2} - r_{i-II} \right) \frac{(z_i - z_{i-II})}{r_{i-II}} + k_{II} \left(r_{i-II} - \frac{d_c}{2} \right) v_{zi}, & r_{i-II} < \frac{d_c}{2}; \\
 0, & r_{i-II} \geq \frac{d_c}{2}; \end{cases} \\
 + \sum_{j=I}^{N_i} \begin{cases} c(d_c - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + k_e (r_{ij} - d_c) (v_{zi} - v_{zj}), & r_{ij} < d_c; \\
 0, & r_{ij} \geq d_c; \end{cases} - m_e g,
 \end{cases} \quad (3)$$

Теплоноситель в рамках предлагаемой модели считается сплошной средой, сильно сжимаемой и обладающей внутренней вязкостью. В этом случае базовыми уравнениями, описывающими механическое поведение среды, являются уравнения Навье-Стокса, которые в трехмерном случае можно записать следующим образом:

$$\begin{cases}
 \frac{\partial v_x}{\partial t} = -v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} + F_x - \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \\
 + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \\
 \frac{\partial v_y}{\partial t} = -v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} + F_y - \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \\
 + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \\
 \frac{\partial v_z}{\partial t} = -v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + F_z - \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \\
 + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right); \\
 \frac{\partial p}{\partial t} = -\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - v_x \frac{\partial p}{\partial x} - v_y \frac{\partial p}{\partial y} - v_z \frac{\partial p}{\partial z},
 \end{cases} \quad (4)$$

В модели принято, что каждое зерно проса имеет постоянную по всему его объему температуру T_i и влажность W_i . По мере нагрева зерен СВЧ и взаимодействия их с теплоносителем изменяются их температура и содержание влаги. Расчет T_i и W_i в процессе сушки производится с использованием уравнений математической физики в конечных разностях. На каждом шаге интегрирования τ рассчитывается новое значение содержания влаги и температуры элемента i , взаимодействующего с теплоносителем по следующим итерационным формулам:

$$W_i^{\tau+1} = W_i^{\tau} - k_{\theta} e^{k_D(T_i^{\tau} - T_K)} (W_i^{\tau} - W_{TH}) \Delta t; \quad (5)$$

$$T_i^{\tau+1} = T_i^{\tau} - \chi_T (T_i^{\tau} - T_{TH}) \Delta t, \quad (6)$$

Начальные условия для системы (3)–(6) имеют вид:

$$v_{xi}^0 = v_{yi}^0 = v_{zi}^0 = 0, \quad T_i^0 = T_K = 20^{\circ} C, \quad W_i^0 = W_0 = 22 \%, \quad \rho_{i,j,k}^0 = \rho_0, \\ v_{x,i,j,k}^0 = v_{y,i,j,k}^0 = v_{z,i,j,k}^0 = 0.$$

Граничные условия:

– механическое движение зерен проса ограничено рабочими поверхностями сушильной камеры. Если в процессе движения зерна внедряются в рабочую поверхность, в модели возникает возвращающая сила, пропорциональная величине внедрения, и под ее действием зерна возвращаются внутрь сушильной камеры;

– при решении задач тепло- и влагопереноса граничными условиями считаются условия взаимодействия зерен и окружающего их теплоносителя. В модели считается, что теплоноситель имеет постоянные в пространстве и во времени значения температуры T_T и влажности W_T ;

– для уравнений движения сплошной среды граничные условия задаются в узлах, расположенных на границе сушильной камеры и теплоносителя. Для определения этих узлов среди $20 \times 20 \times 20$ узлов модельного пространства используются следующие неравенства:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \sqrt{x_{i,j,k}^2 + y_{i,j,k}^2} - \left(R_1 + (R_2 - R_1) \frac{z_{i,j,k}}{z_1} \right) \right| < d, \text{ при } z_{i,j,k} < z_1; \\ \left| \sqrt{x_{i,j,k}^2 + y_{i,j,k}^2} - R_2 \right| < d, \text{ при } z_1 < z_{i,j,k} < z_2; \\ \left| z_{i,j,k} - z_2 \right| < d, \text{ при } z_{i,j,k} > z_2, \end{array} \right. \quad (7)$$

– в граничных узлах плотность среды считается равновесной $\rho_{i,j,k} = \rho_0$, а скорость среды равна проекции на касательную плоскость к рабочей поверхности в данном граничном узле усредненного вектора скорости в соседних узлах (из внутренней области сушильной камеры).

Результаты математического моделирования представлены на рисунках 7-10.

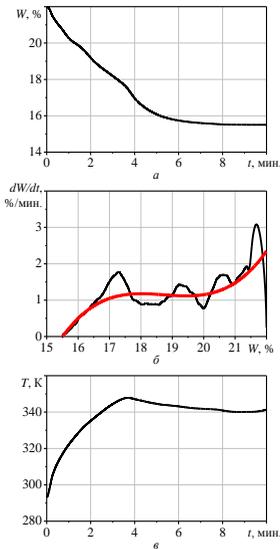


Рисунок 7 – Изменение в процессе сушки проса: a – влажности; b – скорости сушки; v – температуры

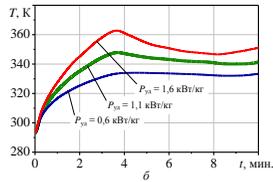
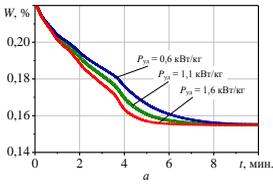


Рисунок 8 – Изменение в процессе сушки проса влажности (a) и температуры ($б$) при различной мощности СВЧ-излучения $P_{уд}$

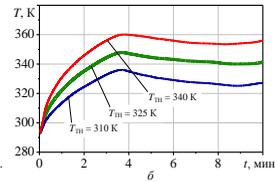
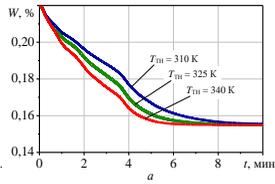


Рисунок 9 – Изменение в процессе сушки проса влажности (a) и температуры ($б$) при различной температуре теплоносителя $T_{ГН}$

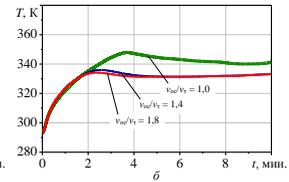
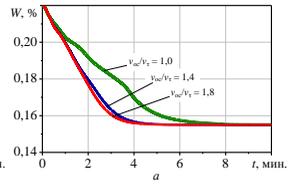


Рисунок 10 – Изменение в процессе сушки проса влажности (a) и температуры ($б$) при различном соотношении скорости потока $v_{ос}/v_{τ}$

Полученные кинетические закономерности процесса сушки зерна проса при различных температурах, соотношениях скоростей осевого и тангенциального потоков теплоносителя и мощности СВЧ-излучения показали хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными: среднеквадратичное отклонение по абсолютному значению не превышало 20 %.

В пятой главе дано описание разработанных на основе проведенных исследований конструкции сушильной установки с активным гидродинамическим режимом и СВЧ-энергоподводом и способа автоматического управления к ней, а также нового компоновочного решения технологической схемы комплексной переработки зерна проса.

На рисунке 11 изображена схема технологической линии безотходной переработки проса.

Технологическая линия безотходной переработки проса состоит из следующего оборудования на соответствующих технологических участках: комплекс первичной обработки и сушки зерен проса I – камнеотборочная машина 1, весы автоматические порци-

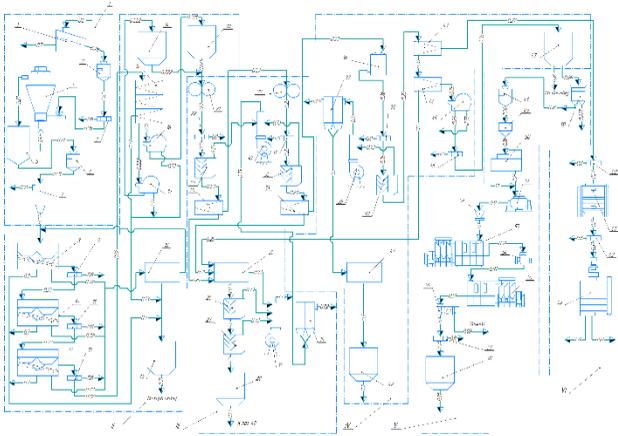


Рисунок 11 – Технологическая линия комплексной переработки зерна проса

онные 2 и 6, магнитный сепаратор 3, сушилка 4, накопительный бункер 5, циклон 7; комплекс сепарирования и просеивания II – сепаратор для первичной очистки зерна 8, воздушно-ситовые сепараторы 10 и 12, магнитные сепараторы 9, 11 и 13, бункер для мелкой фракции 14, крупосортировочная машина 15, аспиратор для мелкой фракции 16, аспиратор для крупной фракции 17, просеивающая машина 18, бункер для зерновых отходов 19, бункер для крупной фракции 20; комплекс шелушения III – шелушильные центробежные машины 21 и 29, магнитный сепаратор 22 и 31, аспирационная колонна 23, 26, 27 и 32, контрольные сита 24 и 33, просеивающая машина 25, накопительный бункер 28, пневмотранспорт 30 и 34, батарея циклонов 35; комплекс шлифования IV – шлифовальная машина 36, блок циклонов 37, магнитные сепараторы 38 и 46, пневмотранспорт 39, аспирационная колонна 40, машина контроля мучки 41, накопительный бункер 42, контрольные сита 43 и 44, аспиратор 45, накопительный бункер 47; комплекс производства варено-сушеных круп V – весы автоматические порционные 48, подвесной бункер 49, моечная машина 50, варочный аппарат 51, бункер-рыхлитель 52, ленточная конвейерная сушилка 53, вальцовый станок 54, ленточная ИК-сушилка 55, крупосорти-

ровка 56, магнитный сепаратор 57, бункер-накопитель 58, фотосепаратор 59; комплекс получения масла VI – магнитный сепаратор 60 и 62, пятивальцевый станок 61, пресс 63.

Предлагаемый аппарат для сушки зерна проса с закрученными потоками теплоносителя и СВЧ-энергоподводом (рисунок 12) (патент РФ № 2544406) способствует повышению качества высушиваемого продукта за счет применения «щадящего» режима сушки, обеспечивает интенсификацию процесса теплообмена за счет применения комбинированного энергоподвода, равномерности закручивания, упрощения загрузки продукта.

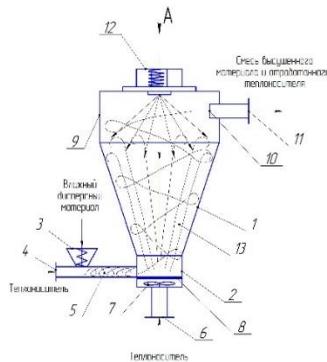


Рисунок 12 – Аппарат для сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом:

- 1 – сушильная камеры; 2 – улитка; 3 – питатель; 4 – патрубок подачи тангенциального потока теплоносителя; 5 – разгонный участок;
- 6 – патрубок для подвода осевого потока теплоносителя;
- 7 – завихритель; 8 – решетка; 9 – цилиндрическая часть; 10 – окно;
- 11 – патрубок для вывода высушенного материала и отработанного теплоносителя; 12 – СВЧ-излучатель; 13 – потоки теплоносителя

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Определены физико-механические, теплофизические и электрофизические характеристики зерна проса как объекта сушки.
2. Произведен дифференциально-термический анализ продукта и выявлены температурные интервалы, соответствующие удалению влаги с различной формой связи.

3. Изучены кинетические закономерности процесса сушки зерна проса во взвешенно-закрученном состоянии с СВЧ-энергоподводом.

4. Определены рациональные режимы работы установки для сушки зерна проса: температура воздуха, подаваемого в сушилку, – 325...327 К, отношение скорости осевого потока воздуха, подаваемого в сушильную установку к скорости тангенциального потока воздуха, – 1,27...1,55, удельная мощность СВЧ-энергоподвода – 0,09...0,11, кВт/кг.

5. Разработана математическая модель процесса сушки зерна проса, позволяющая произвести качественную оценку процесса сушки зерна проса в зависимости от характера скоростей в сушильной камере, температуры теплоносителя и подводимой мощности СВЧ-энергии.

6. Разработана новая конструкция сушильного аппарата (патент РФ № 2544406), схема автоматического управления (патент РФ № 2547345) и компоновочное решение технологической схемы комплексной переработки зерна проса.

7. Проведены промышленные испытания на ООО «Воронежсельмаш» и АО «Воронежский экспериментальный комбикормовый завод», подтверждающие полученные оптимальные технологические параметры разработанного сушильного оборудования для зерна проса.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

i – номер зерна; m_c и d_c – масса и диаметр i -го зерна; x_i , y_i , z_i – декартовы координаты зерна; t – время; k_m – коэффициент линейного вязкого трения при движении зерна в потоке теплоносителя; v_{xm} , v_{ym} , v_{zm} – компоненты вектора скорости теплоносителя в месте нахождения i -го зерна; c и k_e – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия зерен с поверхностью сушильной камеры; N_c – количество зерен; j – номер зерна, возможно контактирующего с i -м зерном; $r_{i-П}$ – расстояние от центра i -го зерна до поверхности сушильной камеры; $x_{i-П}$, $y_{i-П}$, $z_{i-П}$ – декартовы координаты точки касания зерна поверхности сушильной камеры; r_{ij} – расстояние между центрами зерен i и j ; v_{xi} , v_{yi} , v_{zi} – декартовы составляющие скорости i -го зерна; g – ускорение свободного падения; τ и $\tau+1$ – индексы текущего и следующего временного шага; Δt – шаг интегрирования по времени; (x_i, y_i, z_i) , (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) и (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) – положение, скорость, ускорение зерна; $x_{i,j,k}$, $y_{i,j,k}$, $z_{i,j,k}$ – координаты узла пространства (i, j, k) ; R_1 и R_2

– радиусы горловины и основной части сушильной камеры; z_1 – высота перехода конической части сушильной камеры в цилиндрическую; z_2 – высота сушильной камеры; d – размер ячейки пространства; v_x, v_y, v_z – компоненты вектора скорости среды в выбранной точке; t – время; F_x, F_y, F_z – компоненты вектора массовой плотности объемных сил, действующих на сплошную среду (сила в расчете на единицу массы); α – коэффициент пропорциональности плотности теплоносителя и давления (в приближении о линейной их связи); ρ – плотность теплоносителя в выбранной точке; λ – коэффициент сжимаемости среды; μ – коэффициент внутреннего трения.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Антипов, С.Т. Исследование теплофизических характеристик зерна проса, высушенного в аппарате с закрученными потоками теплоносителя и СВЧ-энергоподводом // С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, Д.А. Нестеров // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – № 2 (68). С. 11-15.

2. Антипов, С.Т. Математическое описание процесса сушки зерна проса в аппарате с активным гидромеханическим режимом // С.Т. Антипов, Д.А. Нестеров // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. № 3 (69). – С. 77-81.

3. Антипов, С.Т. Алгоритм управления процессом сушки дисперсных материалов в аппарате с закрученными потоками теплоносителя и СВЧ-энергоподводом // С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, Д.А. Нестеров, А.С. Марухин // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2015. № 1 (63). – С. 86-89.

4. Антипов, С.Т. Математическое моделирование движения зерна проса в сушильном аппарате со взвешенно-закрученным слоем // С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, Д.А. Нестеров, В.В. Посметьев // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2015. № 4 (8). – С. 46-53.

Патенты на изобретения

5. Пат. 2544406 РФ, МПК F26B17/10(2006.01), 3/347 (2006.01). Аппарат для сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом / Казарцев Д.А., Антипов С.Т., Журавлев А.В., Нестеров Д.А., Бородкина А.В.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. инж. технол. - № 2013150692/06; заявл. 14.11.2013; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8.

6. Пат. 2547345 РФ, МПК F26B25/22(2006.01). Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоснабжением / Казарцев Д.А., Антипов С.Т., Журавлев А.В., Нестеров Д.А., Бородкина А.В., Виниченко С.А.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. инж. техн. - № 2013156470/06; заявл. 19.12.2013; опубл. : 10.04.2015, Бюл. № 10.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

7. Программа для моделирования СВЧ-сушки семян проса во взвешенно-закрученном слое / Антипов С.Т., Нестеров Д.А., Журавлев А.В., Посметьев В.В., Казарцев Д.А., Марухин А.С., Бородкина А.В., Свидетельство РОСПАТЕНТА о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015615868; заявл. 30.03.2015; зарегистрир. 26.05.2015.

8. Программа для моделирования движения семян проса в сушильной камере / Антипов С.Т., Нестеров Д.А., Журавлев А.В., Посметьев В.В., Свидетельство РОСПАТЕНТА о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016612405; заявл. 28.12.2015; зарегистрир. 26.02.2016.

Статьи и материалы конференций

9. Марухин, А.С. Анализ физико-химических параметров проса / А.С. Марухин, А.В. Журавлев, Д.А. Нестеров // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие современной науки». – 2014. – С. 105-107.

10. Антипов, С.Т. Применение проса при производстве продуктов питания / С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, Д.А. Нестеров // Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство». – 2013. – С. 461-462.

11. Антипов, С.Т. Комбинированные аппараты с закрученным потоком теплоносителя для сушки дисперсных материалов / С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, Д.А. Казарцев, А.В. Бородкина, Д.А. Нестеров // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2014. № 2. – С. 52-59.

Подписано в печать 22.03.2018. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий»
(ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Отдел полиграфии и технических средств ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

Адрес университета и отдела полиграфии:

394036, Воронеж, пр. Революции, 19