

## ОТЗЫВ

официального оппонента заслуженного работника высшей школы РФ, доктора технических наук, профессора кафедры «Электротехника, теплотехника и гидравлика» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» **ПОПОВА Виктора Михайловича** на диссертационную работу **ЖУРАВЛЕВА Алексея Владимировича** на тему: «*Научное обеспечение и разработка ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя (теория, техника, управление)*», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»

**Актуальность работы.** Сушка одна из важнейших операций подготовки сырья к последующему процессу его переработки. Режимы сушки определяются содержанием в них влаги и обуславливают значительное влияние на изменения денатурацию белка, углеводов, окисление липидов, изменение органических кислот и витаминов и т.п. Анализируя обзор современной техники и технологии сушки дисперсных продуктов установлено, что в основном применяются барабанные, шахтные, ротационные конвективные сушилки, обладающие существенными недостатками: большие металло- и габаритоемкость, сложности ремонта и обслуживания, большие эксплуатационные и капитальные затраты и т. д. Для мелкосеменных культур процесс сушки в них при различных режимах протекает относительно малоэффективно в сравнении с процессом сушки традиционных зерновых культур вследствие незначительных эффективных диаметров межзерновых каналов; низкая гидродинамическая активность, и как следствие, низкие коэффициенты тепло- массопередачи; малая величина поверхности контакта семян с теплоносителем. и т.п.

В настоящее время актуальным является повышение интенсивности процесса сушки и создание высокоэффективных сушильных аппаратов, позволяющих значительно повысить ресурсосбережение и улучшить качество готовых дисперсных продуктов, что является одной из основных задач агропромышленного сектора экономики России.

Одним из перспективных направлений создания новой сушильной техники, обеспечивающей, наряду с получением продукта заданного качества, экономное энергопотребление и эффективное улавливание продуктов уноса, является разработка

и внедрение в промышленность высокоинтенсивных аппаратов с закрученными потоками теплоносителя. При движении дисперсного материала в таких аппаратах происходит непрерывное взаимодействие частиц друг с другом и со стенкой сушилки, что приводит к увеличению относительной скорости движения взаимодействующих фаз, времени пребывания материала в аппарате, повышению концентрации твердой фазы. Использование закрученных потоков теплоносителя, а также комбинирование их с различными гидродинамическими режимами и СВЧ-энергоподводом позволяет интенсифицировать процесс сушки и расширить область применения сушильных аппаратов. Учитывая это, разработка ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя требует научного обоснования и представляет как теоретический интерес, так и практическую ценность.

Значимость представленной работы подтверждается тем, что она выполнялась в рамках федеральных и областных целевых программ, по государственному заданию и отмечена дипломами и медалями.

Исходя из этих положений, в диссертационной работе Журавлева Алексея Владимировича верно сформулированы цели и задачи исследований, актуальность которых не вызывает сомнений.

**Достоверность полученных результатов, основных выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации.** Содержащиеся в работе научные подходы, положения и выводы основаны на фундаментальных научных положениях и теориях. Они базируются на общепринятых теоретических закономерностях, опираются на полученные соискателем экспериментальные данные и являются логическим обоснованием путей их получения и следствием. Использованные соискателем методики экспериментальных исследований, методы и средства проведения измерений, контроля, а также достаточная повторность замеров не дают оснований для сомнения в их достоверности. В работе отсутствуют взаимно противоречащие положения и выводы.

Полученные в диссертационной работе результаты экспериментальных исследований научно обоснованы и являются новыми. Автор подтвердил достоверность предложенных математических моделей проверкой на адекватность. Соискатель разработал ряд новых технических решений, защищенных патентами РФ.

Исходя из этого научные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы следует считать обоснованными и достоверными.

**Научная новизна работы.** Разработана совокупность научных положений, представляющих системный концептуальный подход к созданию высокоэффективных ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя, направленных на интенсификацию, сбережение и рациональное использование материальных ресурсов, что достигается моделированием и оптимизацией перспективных конструкций сушильных установок.

Установлено влияние влажности и температуры на физико-механические, структурно-сорбционные, теплофизические и электрофизические свойства семян расторопши, амаранта, рапса, гречихи, дробины послеспиртовой зерновой барды, а также предложены математические уравнения, адекватно описывающие полученные экспериментальные зависимости.

Получены основные зависимости гидродинамики взвешенно-закрученного слоя. Определены механизм и основные закономерности кинетики сушки семян расторопши, амаранта, рапса, гречихи и дробины послеспиртовой зерновой барды в закрученном потоке теплоносителя, нестационарность полей температуры и влагосодержания частиц продукта; определены численные значения и диапазон изменения основных кинетических характеристик; по результатам планирования экспериментов и статистической обработки экспериментальных данных установлено влияние различных факторов на кинетику процесса сушки, проведена теоретическая оптимизация сушильных установок и выявлены рациональные интервалы изменения параметров процесса.

Разработаны и экспериментально апробированы:

– математическая модель динамического изменения полей температуры и влагосодержания в условиях сопряженного тепломассообмена в процессе сушки семян амаранта во взвешенно-закрученном слое;

– математическая модель процесса сушки семян рапса в аппарате с закрученным потоком теплоносителя и СВЧ-энергоподводом;

– математическая модель распределения полей скоростей теплоносителя и гречихи в цилиндроконической сушильной камере;

– математическая модель процесса сушки дробины послеспиртовой зерновой барды в аппарате с закрученным потоком теплоносителя в безразмерном критериальном виде.

Предложено математическое описание процесса движения дисперсного продукта в кольцевом канале вихревой камеры, устанавливающее связь между высотой кольцевого канала и минимальным расходом теплоносителя и определяющее момент уноса частицы из камеры после высушивания ее в электромагнитном поле СВЧ.

Разработаны конечно-разностные схемы для численного интегрирования уравнений диффузионно-фильтрационной модели А.В. Лыкова с сопряженными граничными условиями, с помощью которых получены динамические распределения полей температуры, влагосодержания и давления, позволяющие определить влияние их структуры на кинетику явлений переноса в процессах сушки в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом.

Разработаны программно-логические алгоритмы функционирования систем управления технологическими параметрами процесса сушки в аппаратах с закрученными потоками теплоносителя с использованием микропроцессорной техники.

**Практическая значимость и реализация результатов работы.** Определены и обоснованы рациональные технологические режимы процесса сушки семян амаранта, рапса, расторопши, гречихи и дробины послеспиртовой зерновой барды в закрученном потоке теплоносителя, а также с применением СВЧ-энергоподвода.

Разработан комплекс экспериментальных стендов, действующих макетов, приборов и методик для исследования процессов интенсивного обезвоживания дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя.

Разработана программа для ЭВМ (свид. Роспатента о гос. регистрации № 2015615868) и программно-логические алгоритмы (пат. РФ № 2290583, 2547345, 2239138) функционирования систем, позволяющие обеспечить многоканальное многоуровневое управление и получать готовый продукт высокого качества за счет оптимизации технологических параметров процесса сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя.

В рамках обеспечения ресурсосбережения разработаны: способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в вихревом режиме (пат.

РФ № 2335717), способ автоматического управления процессом сушки полидисперсных материалов во взвешенно-закрученном слое (пат. РФ № 2340853), способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом (пат. РФ № 2547345), способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой (пат. РФ № 2350866).

Проведен эксергетический анализ процесса сушки в закрученном потоке, свидетельствующий о термодинамическом совершенстве разработанных способов производства. Выполнены расчеты и разработана конструкторская документация на сушилки со взвешенно-закрученным слоем ВСЖ-300, ВСЖ-1000 (пат. РФ № 2338981).

Разработаны ресурсосберегающие машинные технологии комплексной переработки объектов исследования: технологическая линия белково-витаминного кормопродукта из послеспиртовой зерновой барды (пат. РФ № 2307155), способ безотходной переработки семян амаранта и технологическая линия для его осуществления (пат. РФ № 2426773), технологическая линия безотходной переработки семян рапса (пат. РФ № 2494141); проведено их системное проектирование.

Проданы лицензии (договоры № РД 0065317 от 03.06.2010 г., № РД 0076125 от 04.02.2011 г., № РД 0068245 от 10.08.2010 г., № РД 0119399 от 21.02.2013 г., Л.Д. № 27/10 «НОУ-ХАУ» от 20.08.2010 г.) на право использования интеллектуальной собственности предприятиями ООО «Авангард», ООО «Тигровый орех», ООО «Кормопродукт», ООО «Энергия Природы», ООО «Техинмаш» по патентам РФ на изобретения № 2312280, 2327095, 2338981, 2425311.

Полученные результаты используются в учебном процессе в качестве материалов лекционных курсов, курсового и дипломного проектирования.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, восьми глав, основных выводов и результатов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 345 страницах машинописного текста, содержит 298 рисунков и 55 таблиц. Список литературы включает 252 наименования, в том числе 36 на иностранных языках. Приложения к диссертации приведены на 133 страницах.

**Во введении** охарактеризовано современное состояние процессов сушки пищевых дисперсных продуктов, обоснована актуальность темы диссертационной рабо-

ты, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе** систематизирована информация о современном состоянии техники сушки дисперсных продуктов, способах и аппаратах для проведения процесса сушки с использованием закрученных потоков теплоносителя, гидродинамике аппаратов с закрученными потоками теплоносителя; рассмотрены основные возможности совершенствования и интенсификации процесса сушки и создания высокоэффективного сушильного оборудования; рассмотрено взаимодействие микроволновых электромагнитных полей с пищевыми продуктами. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** представлены основные свойства семян амаранта, рапса, расторопши, гречихи и дробины послеспиртовой зерновой барды как объектов сушки. Исследованы физико-механические, теплофизические, электрофизические свойства.

Приведены результаты исследования форм связи влаги методом дифференциально-термического и термогравиметрического анализа.

**В третьей главе** приведены результаты исследований гидродинамики и кинетики сушки дробины послеспиртовой зерновой барды в закрученном потоке теплоносителя. В результате исследований были определены рациональные режимы процесса сушки дробины послеспиртовой зерновой барды в закрученном потоке теплоносителя. Разработана математическая модель процесса сушки дробины послеспиртовой зерновой барды в аппарате с закрученным потоком теплоносителя, представленная в безразмерном критериальном виде, и создано программное обеспечение, позволяющее провести численный расчет тепло- и массообменных полей. Представлено комплексное исследование качества дробины послеспиртовой зерновой барды, высушенной во взвешенно-закрученном слое.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований гидродинамических и кинетических закономерностей процесса сушки семян амаранта во взвешенно-закрученном слое. В результате исследований гидродинамики взвешенно-закрученного слоя семян амаранта были установлены скорости, перепады давления, удельная нагрузка семян, позволяющие осуществить интенсивный взвешенно-закрученный слой в сушильном аппарате. Установлено влияние температуры теплоносителя, соотношения осевого и общего расходов теплоносителя, угла

отклонения закручивающего потока теплоносителя от тангенциального положения в вертикальной плоскости, угла отклонения закручивающего потока теплоносителя от тангенциального положения в горизонтальной плоскости на кинетику сушки семян амаранта. В результате многофакторного статистического анализа процесса сушки семян амаранта получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс сушки под влиянием исследуемых факторов и инженерные номограммы для определения режимных параметров процесса. Предложена математическая модель динамического изменения полей температуры и влагосодержания в условиях сопряженного тепломассообмена в процессе сушки семян амаранта во взвешенно-закрученном слое. Приведены результаты качественной оценки амарантового масла, полученного из семян, высушенных на экспериментальной установке.

**В пятой главе** приведены результаты исследований процесса сушки семян рапса в СВЧ-аппарате с закрученным потоком теплоносителя. Исследовано влияние основных факторов на кинетику сушки. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, по которым построены инженерные номограммы, а также поставлена и решена задача оптимизации. Разработана математическая модель процесса сушки семян рапса в аппарате с закрученным потоком теплоносителя и СВЧ-энергоподводом. Проведена комплексная оценка качества семян рапса.

**В шестой главе** представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса сушки семян рапса в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом. Разработана математическая модель процесса движения дисперсного продукта в кольцевом канале вихревой камеры, устанавливающая связь между высотой кольцевого канала и минимальным расходом теплоносителя и определяющая момент уноса частицы из камеры после высушивания ее в поле СВЧ. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, построены инженерные номограммы, а также поставлена и решена задача оптимизации. Установлены рациональные параметры процесса. Проведен сравнительный анализ качественных показателей семян рапса, высушенных на экспериментальной установке конвективным способом, а также в сочетании с СВЧ-энергоподводом.

**В седьмой главе** приведены исследования процесса сушки семян гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя. Предложена математическая модель распределения полей скоростей теплоносителя и гречихи в цилиндроконической сушильной камере, позволяющая вычислить коэффициенты тепло- и массоотдачи от поверхности частицы к теплоносителю. Изучено влияние температуры теплоносителя, расхода тангенциально подводимого потока теплоносителя и соотношения диаметров конической части корпуса на кинетику сушки семян гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя. Получены рациональные режимы процесса сушки.

**В восьмой главе** приведены разработанные автором ресурсосберегающие машинные технологии комплексной переработки объектов исследования: технологическая линия белково-витаминного кормопродукта из послеспиртовой зерновой барды, способ безотходной переработки семян амаранта и технологическая линия для его осуществления, технологическая линия безотходной переработки семян рапса; проведено их системное проектирование.

Разработаны высокоэффективные сушильные установки с закрученными потоками теплоносителя, способы их автоматического управления и программно-логические алгоритмы функционирования систем управления технологическими параметрами процесса сушки в аппаратах с закрученными потоками теплоносителя с использованием микропроцессорной техники. Приведены результаты эксергетического анализа процесса сушки в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом.

Автором предложен новый системный концептуальный подход к созданию ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя в рамках реализации поставленной цели и задач работы.

**Выводы** отражают основные результаты диссертационной работы.

**В приложении** приведены материалы, подтверждающие коммерциализацию и практическое внедрение результатов работы.

**Публикации.** По материалам работы опубликовано 120 работ, в том числе 4 монографии, 35 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получен 21 патент РФ на изобретения и 1 свидетельство Роспатента о регистрации программ для ЭВМ.

**Соответствие автореферата основным положениям.** Автореферат полностью отражает содержание диссертации и оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ.

### **Замечания к диссертации**

1. Эксперименты на малых размерах лабораторных установок не всегда дают адекватные результаты. Каким образом проводился масштабный переход от экспериментальных сушилок к опытно-промышленным образцам?

2. Вызывает сомнение в необходимости при применении регрессионного анализа учета большого числа значащих цифр после запятой в эмпирических коэффициентах, тем более что параметры, которые рассчитываются с помощью этих уравнений, определяются с погрешностью не менее 10 %.

3. Кинетика влагоудаления, определенным образом, зависит от влагосодержания сушильного агента. Однако автор не рассмотрел влияние этого параметра на изменение полей температуры и влагосодержания. Вместе с тем отсутствует информация о влиянии расхода исходного продукта на кинетику процесса.

4. Отсутствуют сведения об очистке отработанного теплоносителя от мелких частиц продукта в процессах сушки в закрученном потоке теплоносителя.

5. Отсутствует сравнительная оценка предлагаемых способов сушки по технико-экономическим показателям и качеству получаемых продуктов с традиционными способами.

Приведенные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Некоторые замечания носят характер предложений по направлениям дальнейших исследований.

### **Заключение**

В диссертационной работе Журавлева Алексея Владимировича предложена, научно и экспериментально обоснована совокупность методов и технических средств для высокоэффективного проведения ресурсосберегающих процессов сушки дис-

персных продуктов в закрученном потоке теплоносителя. Диссертация Журавлева А.В., как научно-квалификационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых ВАК РФ к докторским диссертациям, а ее автор Журавлев Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств».

Официальный оппонент:

заслуженный работник высшей школы РФ,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Электротехника, теплотехника  
и гидравлика» ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова»

 Попов В.М.

«7» июня 2016 г.

Адрес: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8.

E-mail: [etgvglta@mail.ru](mailto:etgvglta@mail.ru)

Тел рабочий: 8-473-253-73-08

