

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Казарцева Дмитрия Анатольевича** «Развитие научно-практических основ сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»

Актуальность темы

В настоящее время в России проблема обновления парка технологического оборудования является весьма актуальной. Остро стоит проблема с сушильным оборудованием, относящимся к наиболее энергоемким технологическим аппаратам, широко применяемым в производстве пищевых продуктов.

Одним из путей снижения энергозатрат является использование комбинированных способов сушки, в том числе конвективной и с СВЧ-энергоподводом. Однако создание сушильных установок с комбинированными способами подвода тепла невозможно без развития научно-практических основ кинетики сушки, математического моделирования и прогнозирования кинетических характеристик. В связи с этим актуальность рассматриваемой диссертационной работы не вызывает сомнений.

Научная новизна работы

Разработана методология применения кинетики гетерогенных химических процессов к моделированию процессов сушки с СВЧ-энергоподводом. На основе законов кинетики гетерогенных химических процессов разработаны математические модели процесса сушки с СВЧ-энергоподводом для кориандра, смородины, яблок и расторопши.

Теоретически обоснованы и экспериментально проверены закономерности влияния на кинетику сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом технологических параметров и характеристик высушиваемых продуктов: температуры, относительной влажности и скорости движения сушильного агента; изменения поверхности сушки; подводимой к продукту СВЧ-мощности; влагосодержания и энергии связи влаги с сухим материалом.

Предложена функциональная взаимосвязь между постоянной скоростью первого периода и убывающей скоростью второго периода.

Разработана и экспериментально проверена математическая модель температурной кривой сушки в периоде убывающей скорости в условиях подвода к продукту энергии поля СВЧ.

Разработаны основные положения выбора допустимых тепловых режимов сушки термолабильных пищевых продуктов.

Определен фракционный состав белков в образцах, высушенных с использованием различных типов подвода энергии.

Практическая ценность и реализация результатов работы

Разработаны экспериментальные установки и методики исследования процессов сушки пищевых продуктов с использованием СВЧ-энергоподвода. Определены рациональные режимные параметры сушки семян кориандра, расторопши, яблок и плодов смородины черной.

Разработаны оригинальные конструкции аппаратов для сушки растительных продуктов (пат. РФ № 2548209, 2425311, 2230270, 2255434) и способы управления процессом сушки с комбинированным энергоподводом (пат. РФ № 2444689, 2547345), технологические линии комплексной переработки растительного сырья (пат. РФ № 2503240, 2494141), способы определения прочности связи влаги с веществом (пат. РФ № 2230311, 2758198).

Предложена методика инженерного расчета продолжительности сушки на основании определения скорости сушки и эквивалентного влагосодержания.

Эффективность новых теоретических положений и результаты экспериментальных исследований сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом подтверждены при проведении промышленной апробации и внедрении технических решений в производство.

Проданы лицензии (договора № РД 0065317 от 03.06.2010 г., № РД 0076125 от 04.02.2011 г., № РД 0119399 от 21.02.2013 г., Л.Д. № 27/10 «НОУ-ХАУ») на право использования интеллектуальной собственности предприятиями ООО «Авангард», ООО «Тигровый орех», ООО «Энергия природы», ООО «Техинмаш» по патентам РФ № 2312280, 2327095, 2425311. Совместно с ООО «Завод Воронеж Агромаш» разработаны и внедрены в серийное производство технические решения (пат. РФ № 2753785, 204945, 207765).

Выполнено сравнительное исследование показателей качества объектов исследования, высушенных с применением конвективного и СВЧ-энергоподвода. Произведена оценка энергетической эффективности применения СВЧ-энергоподвода.

Полученные результаты используются в учебном процессе в качестве материалов для курсового и дипломного проектирования.

Достоверность результатов и основных выводов диссертации

Достоверность полученных результатов обеспечивается большим объемом выполненных экспериментальных работ на представительном ряде пищевых продуктов, проведением экспериментальных исследований с использованием современного лабораторного оборудования и средств измерений. Полученные теоретические результаты согласуются с данными экспериментальных исследований.

Оценка содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, выводов, библиографического списка из 281 наименования и 8 приложений.

Основной текст работы изложен на 333 страницах, содержит 168 рисунков и 13 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана оценка уровня разработанности темы, приведены научная новизна и практическая значимость выполненных исследований. Сформулирована цель и основные задачи, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе соискатель выполнил обстоятельный анализ современного состояния теории и техники сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом. Рассмотрел современные конструкции установок для сушки пищевых продуктов под воздействием СВЧ-энергии и направления инновационного развития сушки пищевых продуктов в аппаратах с СВЧ-энергоподводом. Автором предложена классификация путей интенсификации процесса сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом.

Далее соискатель провел анализ существующих подходов к математическому описанию процессов сушки с СВЧ-энергоподводом и рассмотрел моделирование процесса сушки с СВЧ-энергоподводом на основе аналогии с законами химической кинетики. В главе изложены основные положения кинетики химических реакций и их применимость к математическому моделированию процессов сушки. Показано влияние основных параметров на кинетику СВЧ-сушки с позиций теории гетерогенных химических реакций.

Во второй главе соискатель обосновал выбор объектов исследования и выполнил их системную оценку. В главе приведены результаты исследования сорбционных, теплофизических, электрофизических свойств выбранных пищевых продуктов. Дана качественная оценка формам связи влаги с материалом. Изложена методика определения интервалов удаления влаги с различными формами связи влаги на основе термического анализа объектов исследования.

В третьей главе автор приводит подробное описание разработанных экспериментальных установок с СВЧ-энергоподводом и методик проведения экспериментальных исследований.

В главе установлены кинетические закономерности сушки семян кориандра и расторопши, яблок и плодов смородины черной в зависимости от начального влагосодержания продукта, температуры и скорости сушильного агента, подводимой СВЧ-мощности, высоты слоя и величины вакуума.

Соискатель показал, что наибольшее влияние на скорость сушки оказывает температура продукта, которую он приобретает при высушивании в результате конвективного теплообмена и СВЧ-нагрева. Поэтому в математических моделях кинетики сушки необходимо применять в качестве параметра абсолютную температуру продукта.

Автором определено, что сушка с конвективным и СВЧ-энергоподводом в вы-соком слое продукта происходит неравномерно по слоям, образуя зону сушки со стороны подвода сушильного агента.

В четвертой главе изложена разработанная методология моделирования процессов сушки на основе аналогии с законами химической кинетики гетерогенных процессов. Проанализированы аналогии между рядом положений кинетики сушки и кинетики гетерогенных химических процессов. Автор детально рассмотрел параметры кинетического уравнения Аррениуса при разработке математической модели процесса сушки.

Кинетическое уравнение первого периода сушки для продуктов, содержащих избыток свободной поверхностной влаги, предложено дополнить введением эффективного предэкспоненциального коэффициента.

Затем соискателем рассмотрены случаи моделирования процессов сушки для частиц продукта, имеющих форму цилиндра, шара и пластины. Получены кинетические уравнения, позволяющие применить методику расчета продолжительности сушки на основе определения эквивалентного влагосодержания.

Пятая глава посвящена разработке математических моделей комбинированного способа сушки, определению эмпирических коэффициентов и экспериментальной проверке научной гипотезы.

Автором разработаны математические модели процесса для сушки семян кориандра и расторопши, яблок и плодов смородины черной, учитывающие фор-

му частиц продукта, скорость и температуру сушильного агента, величину СВЧ-мощности и относительную влажность воздуха.

Определены условия и влияния относительной влажности сушильного агента на скорость сушки в первом периоде.

Предложена методика определения «порядка сушки» графическим методом по результатам исследования продукта на термогравиметрическом инфракрасном влагомере. Величина «энергии активации» в периоде постоянной скорости получена по результатам термического анализа.

Предложена методика инженерного расчета продолжительности сушки.

В шестой главе автором представлено обоснование выбора тепловых режимов сушки на основе кинетики изменений качественных характеристик пищевых продуктов.

Предложено определять область допустимых температурных режимов конвективной сушки с СВЧ-энергоподводом для термолабильных продуктов на основе совместного рассмотрения кинетики сушки с кинетикой физико-химических и других деструктивных превращений. Разработана и апробирована методика определения порядка деструкции термолабильного компонента. Получены расчетные уравнения для определения максимальной продолжительности теплового воздействия на продукт в зависимости от порядка термодеструкции и температуры продукта по результатам лабораторного испытания.

Разработана методика, позволяющая определить максимальную продолжительность сушки и установить функциональную взаимосвязь между максимальной продолжительностью сушки и температурой продукта.

Определены значения параметров модели области допустимых температурных режимов сушки на примере семян кориандра и проведена ее экспериментальная проверка.

Методом электрофоретического исследования определен фракционный состав белков, присутствующих в семенах кориандра и расторопши, высушенных с использованием различных типов подвода энергии. Установлено различное влияние конвективного и комбинированного энергоподвода при сушке семян кориан-

дра и расторопши на изменения первичной структуры белков в продукте. При этом изменения в структуре белков в большей степени определяются тепловым воздействием на продукт, а не способом энергоподвода.

В седьмой главе соискателем обоснованы концептуальные подходы к созданию высокоэффективных аппаратов и технологических линий для сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом, разработаны рекомендации по выбору основных режимных параметров процесса (температура и скорость сушильного агента, необходимая СВЧ-мощность в первом и втором периодах сушки).

Представлены разработанные технологические линии комплексной переработки растительного сырья, обеспечивающие безотходную переработку растительного сырья с получением высушенной продукции высокого качества, а также конструктивные решения для сушильных установок с СВЧ-энергоподводом, позволяющих повысить эффективность процесса сушки, обеспечить высокое качество готового продукта и снизить энергозатраты.

Выполнена оценка эффективности применения СВЧ-энергоподвода для сушки пищевых продуктов. Установлено, что сочетание конвективного и СВЧ-энергоподвода позволяет сократить удельные энергозатраты на процесс сушки.

Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе

По материалам диссертации опубликована 91 работа, в том числе 6 монографий, 24 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 7 статей в журналах, входящих в международные базы Web of Science и Scopus, 5 учебных пособий. Соискателем получено 22 патента РФ и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Замечания

1. Из текста диссертации не ясно, на каких основаниях автор для моделирования кинетики сушки выбрал аналогию с химической кинетикой гетерогенных

процессов. Это обусловлено только использованием СВЧ-энергоподвода? Почему нельзя использовать традиционный подход, основанный на теории тепло- и массообмена?

2. В главе 2 приведены результаты определения теплофизических свойств объектов сушки. Требуется пояснений, каким образом автор использует полученные теплофизические характеристики применительно к разработанной методологии моделирования процессов сушки конкретных продуктов.

3. Вызывает вопрос количество значащих цифр (после запятой) в коэффициентах эмпирических уравнений для определения теплопроводности и теплоемкости объектов сушки.

4. Существенное влияние на кинетику сушки оказывает структурообразование, которое, вероятно, имело место быть при сушке ряда пищевых продуктов с использованием энергии СВЧ-поля. В какой степени разработанная методология моделирования процесса может учитывать явления структурообразования?

5. В чем заключается физический смысл введения функциональной взаимосвязи между скоростью сушки в первом и втором периоде?

6. Чем обоснован выбор частоты СВЧ-поля при проведении экспериментальных исследований и почему при изучении влияния основных факторов на кинетику сушки помимо подводимой удельной СВЧ-мощности не учитывалось влияние частоты переменного электромагнитного поля?

7. Автор приводит сравнение конвективной и комбинированной сушки только по энергозатратам. Следовало бы указать стоимость оборудования, используемого для реализации предложенных способов сушки.

8. В работе сделан вывод о целесообразности импульсного режима подвода СВЧ-энергии. В методике инженерного расчета желательно было привести данные по периодичности и длительности импульса.

Замечания, указанные в отзыве, носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Казарцева Д.А. «Развитие научно-практических основ сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов» является научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые научные подходы в моделировании процессов сушки, изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, что вносит существенный вклад в развитие экономики страны.

Диссертационная работа соответствует п. 1-4 паспорта специальности 05.18.12, требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Казарцев Дмитрий Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 - «Процессы и аппараты пищевых производств».

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
доктор технических наук (05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий»),
профессор

Гатапова Наталья Цибиковна

« 31 » марта 2022 г.

392000, Тамбов, ул. Советская, 106
Телефон: тел.:+79027285191
E-mail: gatapova.nc@mail.tstu.ru

