

На правах рукописи

*Саранов*

**САРАНОВ Игорь Александрович**

**НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ  
И АГЛОМЕРАЦИИ КОНЦЕНТРАТОВ ЦИКОРИЯ  
И ЯЧМЕННОГО СОЛОДА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПРОДУКТОВ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»;  
05.18.01 – «Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2017

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

**Научные руководители:** доктор технических наук, профессор  
**Магомедов Газибег Омарович**  
(ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»),  
доктор технических наук  
**Кочетов Владимир Кириллович**  
ОАО «Кондитерский комбинат «Кубань»

**Официальные оппоненты:** **Максименко Юрий Александрович**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», доцент кафедры «Технологические машины и оборудование»

**Мирошникова Татьяна Николаевна**  
кандидат технических наук,  
ООО КРЦ «ЭФКО-Каскад», начальник отдела по технологической поддержке продаж специализированных жиров для кондитерской отрасли

**Ведущая организация:** ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности», г. Москва

Защита состоится «8» июня 2017 года в 12 часов 30 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> «5» апреля 2017 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> «6» марта 2017 г. Автореферат разослан «17» апреля 2017 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 функционального назначения.

Кондитерские изделия обладают высокой сахаро- и жироемкостью, низкой степенью обогащения функциональными макро- и микронутриентами (витамины, микроэлементы, пищевые волокна, органические кислоты и др.). Для обогащения кондитерских изделий перспективно применять отечественные сырьевые источники: концентраты и порошки цикория, ячменного солода, фруктовых соков и пюре.

Данная работа направлена на совершенствование процессов сушки концентратов цикория (КЦ), ячменного солода (КЯС) и агломерации их порошков для формирования высоких технологических и потребительских свойств пищевых продуктов при сниженных энергозатратах и создании обогащенных кондитерских изделий.

Теоретические основы тепломассообмена в процессе распылительной сушки и их аппаратное оформление отражены в работах А.В. Лыкова, А.С. Гинзбурга, Б.И. Леончика, А.А. Долинского, А.П. Фокина, В.И. Муштаева, Ю.В. Космодемьянского, Д.Г. Пажи, В.С. Галустова, Г.К. Иваницкого, Н.Н. Липатова, В.Д. Харитонова, Г.Б. Дворецкого.

Большой научный и практический вклад в развитие промышленного производства растворимых порошкообразных полуфабрикатов и создание рецептур функциональных продуктов питания, а также кондитерских изделий сбалансированного состава внесли: А.В. Зубченко, Г.А. Маршалкин, Л.М. Аксенова, В.А. Панфилов, З.Г. Скобельская, Г.Б. Цыганова, С.Я. Корячкина, Т.В. Савенкова, М.А. Талейник, В.К. Кочетов, Ф.Г. Нахмедов, В.А. Ломачинский, Г.О. Магомедов, М.Г. Магомедов и др.

В настоящее время передовые технологии получения сухих концентратов предусматривают совмещение процессов сушки и агломерации, где требуется дополнительная паровлажностная обработ-

ка высокодисперсного порошка, полученного сушкой распылением в кипящем слое для окончательной агломерации с последующей подсушкой. Однако эти технологии сложны, трудноуправляемы, требуют значительных энергозатрат и не обеспечивают высоких технологических и потребительских свойств агломерированных порошков, поэтому актуальной задачей является совершенствование процесса, способа и оборудования для распылительной сушки концентратов цикория и ячменного солода с одновременным проведением процесса агломерации их порошков.

Диссертационная работа выполнялась в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» на кафедре «Технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств» в соответствии с тематикой НИР кафедры «Разработка энерго-, ресурсосберегающих и экологически чистых технологий переработки сельскохозяйственного сырья в конкурентоспособные хлебобулочные, кондитерские, макаронные, зерновые и крупяные продукты на основе медико-биологических воззрений» (№ госрегистрации 01201253868).

**Цель диссертационной работы:** научное обеспечение развития процессов распылительной сушки концентратов цикория и ячменного солода, агломерации их порошков и создание функциональных продуктов на их основе.

Для достижения цели необходимо было решить нижеперечисленные задачи.

1. Разработать научно-практический подход к получению агломерированных порошков цикория и ячменного солода повышенной сыпучести и сниженной объёмной массы.

2. Исследовать физико-химические, реологические, теплофизические свойства концентратов цикория и ячменного солода, а также изучить процессы плавления и кристаллизации жира лауринового КС-35 и кокосового масла методом дифференциально-сканирующей калориметрии.

3. Разработать математическую модель агломерации твёрдой дисперсной фазы с использованием жидкостно-капельного орошения.

4. Создать математическую модель конвективной сушки полидисперсных жидкой и твёрдой фаз агломератов, получаемых после камеры жидкостно-капельного орошения распылительной сушилки.

5. Определить рациональные параметры распылительной сушки

концентратов цикория, ячменного солода и агломерации их порошков.

6. Изучить и систематизировать физико-химические, физико-механические, гигроскопические свойства порошкообразных и агломерированных продуктов и сформировать научно обоснованные условия их хранения и применения в производстве пищевых продуктов.

7. Разработать конструкцию распылительной сушильной установки и системы автоматического управления процессами сушки и агломерации порошков цикория и ячменного солода.

8. Разработать научно обоснованную технологию и рецептуру конфет типа пралине с применением агломерированного ячменного солода с повышенной пищевой ценностью и пониженной сахароёмкостью.

9. Изучить влияние рецептурных компонентов и технологических параметров на структурообразование жгутов конфет типа пралине в процессе охлаждения.

10. Провести промышленную апробацию, эксергетический анализ техники и технологий получения агломерированных порошков цикория, ячменного солода и конфет типа пралине.

**Научная новизна.** Изучены кинетические закономерности процессов сушки и агломерации концентратов цикория и ячменного солода, определены формы связи влаги с материалами.

Разработана математическая модель процесса агломерации, позволяющая подбирать рациональные концентрации твёрдых и жидких частиц в камере распылительной сушилки, рассчитывать необходимый путь и длительность совместного взаимодействия твёрдых частиц и жидких капель и оценивать количество образующихся агломератов.

Создана математическая модель конвективной сушки полидисперсных жидкой и твёрдой фаз агломератов после камеры жидкостно-капельного орошения, которая сопряжена с процессами образования агломератов и позволяет описать локальные характеристики гетерогенных потоков: температуру, расход и т. д.

Установлены зависимости изменения равновесных влажностей полученных порошков и агломератов цикория и ячменного солода от относительной влажности среды, позволяющие определить условия хранения и эффективной агломерации.

**Практическая значимость работы.** Практическая значимость исследований заключается в комплексной оценке тепло-массообменных процессов, происходящих при агломерации и сушке исследуемых пищевых концентратов.

Комплексные теоретические и экспериментальные исследования, полученные результаты математического моделирования и анализ работы распылительных сушильных установок с одновременной агломерацией позволили разработать методологический подход к созданию высокоэффективной технологии распылительной сушки, совмещенной с процессом агломерации в одной камере, и соответствующее аппаратное оформление (пат. РФ № 2570536, пат. РК № 30569).

Разработана технология получения конфет типа пралине. Установлено увеличение пищевой, биологической ценности разработанных конфет типа пралине «Солодушка».

Для математического описания необходимой продолжительности охлаждения жгутов пралиновых масс применено уравнение теплопроводности с граничным условием первого рода, позволяющее рассчитывать температурные профили в сечениях жгутов пралиновых масс.

Выполнен экономический расчёт, свидетельствующий об эффективности предлагаемой технологии.

Разработана программа для ЭВМ «Программа для моделирования эволюции температурных полей в конфетном жгуте при его охлаждении» (свидетельство РОСПАТЕНТА о гос. регистрации № 2016616835).

Выполнен эксергетический анализ совмещённых процессов сушки и агломерации исследуемых концентратов, свидетельствующий о повышении термодинамического КПД предлагаемого способа производства агломерированных порошков и позволяющий выявить направления его совершенствования.

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.

Техническая новизна предложенных решений отражена в патентах на изобретения, полученных в РФ и Республике Казахстан. Востребованность в интеллектуальной собственности выражается в виде приобретения неисключительной лицензии на

право использования интеллектуальной собственности по патенту на изобретение РФ № 2570536 ООО «РИТМ».

**Апробация работы.** Материалы и результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на международных и всероссийских научных, научно-технических и научно-практических конференциях и симпозиумах: (Тамбов, 2014), (Воронеж, 2014, 2015, 2016), (Италия, 2014); отчетных научных конференциях ВГУИТ за 2013-2016 гг.

По результатам работы получены награды: почётная грамота за 1-е место в конкурсе 3D – моделирования в номинации «Аспиранты» Международного молодёжного симпозиума «Современные проблемы математики. Методы, модели, приложения»; диплом победителя программы «Участник молодёжного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.») за научные результаты, обладающие существенной новизной и перспективой их эффективной коммерциализации; диплом за активное участие в работе XII Международной научно-технической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации», г. Курск, 2015; бронзовая медаль за разработку «Установки для сушки и агломерации пищевых сред» XIX Московского Международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед-2016»; диплом лауреата премии правительства Воронежской области среди молодых учёных за научно-исследовательскую разработку «Установка для сушки и агломерации пищевых сред».

Проведена промышленная апробация производства порошка ячменного солода на ОАО «Молоко» г. Валуйки, а также производства конфет типа пралине с применением агломерированного ячменного солода на ОАО «Кондитерский комбинат «Кубань».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, получен 1 патент на изобретение РФ, 1 патент на изобретение РК и 1 свидетельство Роспатента о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 183 страницах машинописного текста, содержит 88 рисунков и 28 таблиц. Список литературы включает 150 наименований. Приложения к диссертации представлены на 58 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** охарактеризовано современное состояние пищевой промышленности РФ, обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проанализировано современное состояние теории, техники и технологии производства порошкообразных пищевых продуктов и пралиновых конфет, осуществлён выбор объектов исследования и дана их характеристика с точки зрения процессов сушки, агломерации, обогащения и структурообразования пралиновых масс.

**Во второй главе** проведены исследования реологических свойств на ротационном вискозиметре Rheotest II. Установили, что диспергирование КЦ и КЯС рационально осуществлять в области их полной разрушенной структуры (ньютоновской жидкости) при градиенте  $\gamma \geq 20 \text{ c}^{-1}$ , СВ=40...50 %,  $t=75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Исследовали и определили коэффициенты температуропроводности и теплопроводности КЦ и КЯС методом «вспышки» на установке LFA 467 HyperFlash, а удельную теплоёмкость – на дифференциально-сканирующем калориметре DSC 204 F1 в зависимости от температуры и содержания сухих веществ.

Термогравиметрическим методом на приборе синхронного термического анализа STA – 449 F3 определены формы связи влаги в исследуемых концентратах, которые в дальнейшем заложены в математическую модель распылительной сушки как энергия связи влаги с материалом (таблица 1).

Т а б л и ц а 1 – Формы связи влаги в КЦ и КЯС

Образец	Форма	$\Delta T$	$\Delta t$	$\Delta \alpha$	$\Delta m$	$\text{tg } \alpha$	$E_c$
КЦ	I	304 – 380	31 – 107	0,00 – 0,25	25	0,15	2,7
	II	380 – 422	107 – 149	0,25 – 0,86	61	0,63	12,0
	III	422 – 436	149 – 163	0,86 – 1,00	14	2,41	46,1
КЯС	I	304 – 387	30 – 113	0,00 – 0,30	30	0,16	3,0
	II	387 – 433	113 – 160	0,30 – 0,90	60	0,66	12,6
	III	433 – 447	160 – 174	0,90 – 1,00	10	2,51	48,0

Исследовали кинетику процессов плавления и кристаллизации кокосового масла и жира лауринового КС-35 как структурообразующих компонентов в пралиновой массе методом диф-

ференциально-сканирующей калориметрии на приборе синхронного термического анализа STA-449 F3 (таблица 2).

Т а б л и ц а 2 – Диапазоны плавления и кристаллизации жировых компонентов конфет типа пралине

Образец	Плавление				Кристаллизация			
	$t_n$	$t_n$	$t_k$	$i$	$t_n$	$t_n$	$t_k$	$i$
Кокосовое масло	18,3	24,2	26,4	95,5	13,1	13,1	15,9	-118,3
Жир лауриновый КС-35	28,7	32,2	33,9	147,4	20,4	23,4	25,9	-152,7

В третьей главе для построения модели совокупных процессов физической картины агломерации (рисунок 1) в камере жидкостно-капельного орошения (КЖКО) распылительной сушильной установки (рисунок 2) применили принцип аналогичный химическим превращениям в рамках кинетических превращений.

1. распыление      2. увлажнение      3. затвердевание      4. готовый агломерат



порошок+жидкость      жидкие мостики      твёрдые мостики      структура "ежевика"  
Рисунок 1 – Схема процесса агломерации

Твёрдые частицы, поступающие в камеру жидкостно-капельного орошения обозначили через субстанцию *A*, а распыливаемые форсункой капли раствора – через субстанцию *B*. Соединение субстанций *A* и *B* приводит к образованию новой субстанции *S* (твёрдые частицы с жидкой плёнкой на поверхности).

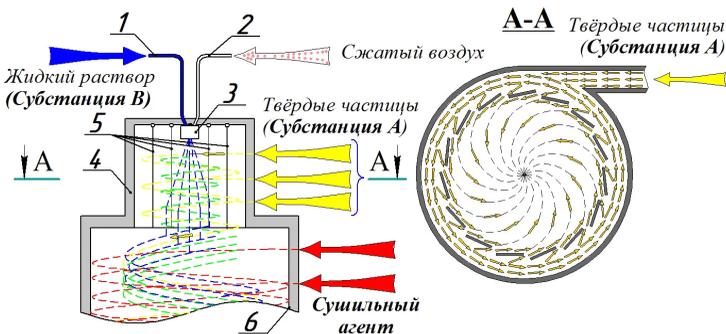


Рисунок 2 – Схема процесса агломерации в КЖКО:

1 – патрубок для жидкого продукта; 2 – линия сжатого воздуха; 3 – пневматическая форсунка; 4 – коллектор; 5 – лопатки; 6 – сушильная камера

Кинетика процесса образования плёнки на частицах определяется кинетическим коэффициентом  $k_1$ , кинетика образования агломератов – кинетическим коэффициентом  $k_2$ . С учётом гидродинамики в камере жидкостно-капельного орошения исходя из того, что вращающийся поток представляет собой поток идеального вытеснения, целесообразно использовать соотношение:  $u = z/t'$ , где  $z$  – координата в направлении закрученного потока;  $u$  – скорость потока.

Описание фазовых превращений в процессе сушки и агломерации запишем в виде задачи Коши системой кинетических уравнений:

$$u \frac{dC_A(z)}{dz} = -2C_A(z)[k_1 C_B(z) + k_2 C_S(z)]; \quad (1)$$

$$u \frac{dC_B(z)}{dz} = -k_1 C_A(z) C_B(z); \quad (2)$$

$$u \frac{dC_S(z)}{dz} = -2C_A(z)[k_1 C_B(z) + k_2 C_S(z)]; \quad (3)$$

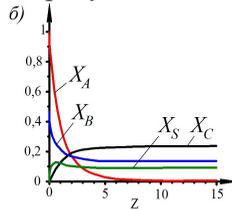
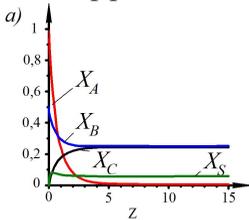
$$u \frac{dC_C(z)}{dz} = k_2 C_A(z) C_S(z), \quad (4)$$

с начальными условиями:

$$C_A(0) = C_A^0; C_B(0) = C_B^0; \quad (5)$$

$$C_S(0) = C_C(0) = 0. \quad (6)$$

Если сократить число определяющих параметров, то система уравнений станет относиться к классу нелинейных и, решая её численно в пакете MAPLE – 15, можно найти различные варианты эффективных режимов (рисунок 3).



где

$$Z = z k_1 C_A^0 / u;$$

$$X_A(Z) = C_A(z) / C_A^0;$$

$$X_B(Z) = C_B(z) / C_A^0;$$

$$X_S(Z) = C_S(z) / C_A^0;$$

$$X_C(Z) = C_C(z) / C_A^0;$$

$$\xi = C_B^0 / C_A^0;$$

$$K = k_2 / k_1$$

Рисунок 3 – Эффективные режимы агломерации: а –  $K=5$ ;  $\xi=0,5$ ; б –  $K=2$ ;  $\xi=0,4$

При моделировании для обеспечения агломерации процесс сушки представлен следующим образом. Из камеры жидкостно-капельного орошения в сушильную камеру с тангенциальным подводом газообразного сушильного агента поступает полидисперсная твёрдожидкостная фаза: твёрдые частицы А, капли раствора В, твёрдые частицы с жидкой плёнкой S, агломераты С.

Примем допущения: вращающийся по нисходящей спирали поток сушильного агента имеет скорость, причём этот поток в трендовом направлении может быть представлен как поток идеального вытеснения в силу турбулентного течения; процесс сушки протекает в недонасыщенном режиме; потерями теплоты через стенки сушилки пренебрегаем; размер капель раствора, твёрдых частиц, агломератов и жидкой плёнки на них регламентирован; кинетика процесса сушки рассматривается с позиции аналогии с кинетикой распада при химическом разложении компонентов.

Исходя из этих допущений рассмотрим структурные формулы превращений при сушке:



где структурная формула (7) означает кинетический процесс испарения капли в пар ( $P_1$ ); структурная формула (8) описывает процесс испарения влаги плёнки с твёрдых частиц, в результате чего образуется высушенная твёрдая фаза ( $A_1$ ) и испаряющийся пар плёнки ( $P_2$ ); структурная формула (9) по смыслу аналогична формуле (8), но  $A_2$  – агломераты твёрдой фазы, а  $P_3$  – пар, испаряющийся с агломератов твёрдой фазы. Не нарушая общности дальнейших рассуждений, будем считать, что толщина плёнки  $\delta$  на твёрдых частицах одна и та же.

Рассмотрим вначале массообменную подзадачу и синтезируем её математическую модель. В силу принятых допущений математическая формализация структурной формулы (7) имеет следующие виды:

$$u \frac{dC_A(z)}{dz} = -k(t')C_B(z); \quad (10)$$

$$u \frac{dC_{P_1}(z)}{dz} = k(t')C_{P_1}(z); \quad (11)$$

с учётом балансового соотношения:

$$C_B(z) + C_{P_1}(z) = C_B^\circ = \text{const}; \quad (12)$$

где  $z$  – продольная координата трендового направления движения сушильного агента в сушильной камере с началом отсчёта в точке его тангенциальной подачи;  $k(t')$  – кинетический коэффициент скорости испарения влаги с капель раствора, зависящий от текущей температуры сушильного агента;  $C_B(z)$ ,  $C_{P_1}(z)$  – концентрации капель раствора и испарившейся с них влаги в виде пара;  $C_B^\circ$  – концентрация капель раствора в точке отсчета концентрации капель на выходе из КЖКО.

Добавим к уравнениям (10) – (12) очевидные начальные условия:

$$C_B(\mathbf{0}) = C_B^\circ; \quad C_{P_1}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}; \quad (13)$$

Формула (8) трансформируется в кинетические уравнения:

$$u \frac{dC_S(z)}{dz} = -k(t')C_S(z); \quad (14)$$

$$u \frac{dC_{A_1}(z)}{dz} = k(t')C_{A_1}(z); \quad (15)$$

$$u \frac{dC_{P_2}(z)}{dz} = k(t')C_{P_2}(z); \quad (16)$$

где  $C_S(z)$ ,  $C_{A_1}(z)$ ,  $C_{P_2}(z)$  – локальные концентрации твёрдых частиц с жидкой плёнкой, твёрдых частиц и испарившейся влаги с твёрдых частиц. К уравнениям (14) – (16) добавим замыкающее условие, которое характеризует баланс:

$$C_S(z) + C_{A_1}(z) + C_{P_2}(z) = C_S^\circ = \mathbf{const}; \quad (17)$$

продифференцировав который по  $z$ , получим:

$$\frac{dC_S(z)}{dz} + \frac{dC_{A_1}(z)}{dz} + \frac{dC_{P_2}(z)}{dz} = \mathbf{0}; \quad (18)$$

подставим (14) – (16) в (18), запишем:

$$C_{A_1}(z) + C_{P_2}(z) = C_S(z), \quad (19)$$

на основании чего система (14) – (17) запишется в виде:

$$u \frac{dC_S(z)}{dz} = -k(t')C_S(z); \quad (20)$$

$$u \frac{dC_{A_1}(z)}{dz} = k(t') [C_S(z) - C_{P_2}(z)]; \quad (21)$$

$$u \frac{dC_{P_2}(z)}{dz} = k(t') [C_S(z) - C_{A_1}(z)]; \quad (22)$$

с начальными условиями:

$$C_S(\mathbf{0}) = C_S^\circ; \quad C_{A_1}(\mathbf{0}) = C_{P_2}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}. \quad (23)$$

Проведя аналогичные рассуждения для структурной формулы (9), получим в итоге:

$$u \frac{dC_C(z)}{dz} = -k(t')C_C(z); \quad (24)$$

$$u \frac{dC_{A_2}(z)}{dz} = k(t') [C_C(z) - C_{P_3}(z)]; \quad (25)$$

$$u \frac{dC_{P_3}(z)}{dz} = k(t') [C_C(z) - C_{A_2}(z)]; \quad (26)$$

$$C_C(\mathbf{0}) = C_C^\circ; \quad C_{A_2}(\mathbf{0}) = C_{P_3}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}. \quad (27)$$

Таким образом, построена замкнутая сопряжённая математическая модель тепломассообмена в камере сушки.

Далее в работе рассматривается первая начально-краевая задача конвективного охлаждения конфетного жгута в виде дифференциального уравнения теплопроводности, начального условия и граничного

условия первого рода. Для определения изменения температуры и по ходу процесса и по слоям использован метод конечно-разностной схемы, реализованный через метод сетки. Составленный алгоритм реализован в виде программы на языке программирования PASCAL. Программа зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 04.05.2016 (свидетельство государственной регистрации № 2016616835).

**В четвертой главе** проводились экспериментальные исследования по получению сухих агломерированных концентратов цикория (АЦ) и ячменного солода (АЯС) с последующим его применением в технологии пралиновых масс в количестве до 50 % (от массы сахара-песка по рецептуре) (рисунки 4, 5).

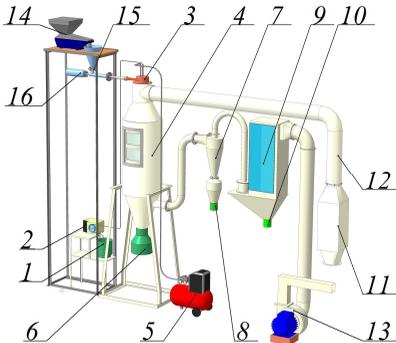


Рисунок 4 – Экспериментальная установка для распылительной сушилки и агломерации пищевых сред: 1 – ёмкость для концентрата; 2 – перистальтический насос; 3 – камера жидкостно-капельного орошения; 4 – сушильная камера; 5 – компрессор; 6 – сборник агломератов; 7 – циклон; 8, 10 – сборники порошка; 9 – скруббер; 11 – калорифер; 12 – трубопровод подачи теплоносителя; 13 – вентилятор; 14 – вибропитатель; 15 – эжектор; 16 – тепловая пушка

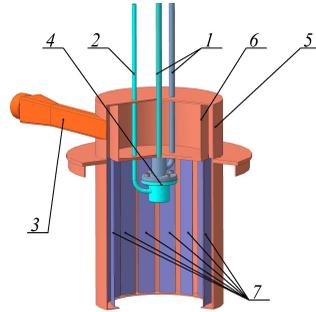


Рисунок 5 – Камера жидкостно-капельного орошения:

1 – подача жидкого продукта; 2 – подача сжатого воздуха; 3 – подача газозвеси; 4 – пневматическая форсунка; 5 – наружная обечайка коллектора; 6 – внутренняя обечайка коллектора; 7 – направляющие лопасти

Рациональные интервалы входных параметров процессов распылительной сушилки концентратов цикория и ячменного солода и агломерации их порошков:  $W_{ц} = 52,1\%$ ;  $W_c = 44,0\%$ ;  $t_{ц} = 171,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_c = 182,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $a_{ц} = 33,85\%$ ;  $a_c = 46,0\%$ . Условием оптимизации было обеспечение минимальных выходных параметров:  $W_{сц} = 2,65\%$ ;  $W_{сc} = 2,51\%$ ;  $\rho_{ац} = 160\text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{ас} = 151\text{ кг/м}^3$ ;  $Q_{ц} = 0,576\text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$ ;  $Q_c = 0,518\text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$ .

Исследовали физико-химические (таблица 3), физико-механические (таблица 4) и гигроскопические свойства порошков и агломератов (рисунок 6), определили рациональные условия для пневмотранспортирования, дозирования, хранения и установили снижение гигроскопичности агломерированных порошков.

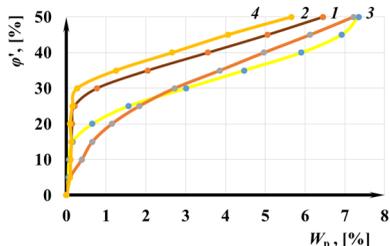


Рисунок 6 – Зависимость равновесной влажности среды от относительной влажности среды:  
1 – ПЦ; 2 – АЦ; 3 – ПЯС; 4 – АЯС

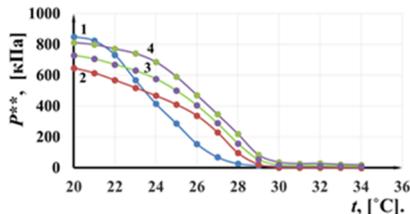


Рисунок 7 – Зависимость пластической прочности жгутов масс типа пралине от температуры в центре жгута при замене сахарной пудры на АЯС, %: 1 – 0 (контроль); 2 – 40; 3 – 50; 4 – 60

Установлено, что с повышением дозировки АЯС ускоряется процесс структурообразования жгутов пралиновых масс. Получена зависимость пластической прочности от температуры и определены рациональные температуры формования и резания конфетных жгутов (рисунок 7).

Т а б л и ц а 3 – Физико-химические свойства концентрата ячменного солода и агломерированного ячменного солода

Пищевые вещества		Содержание в 100 г КЯС СВ=80 %	Содержание в 100 г АЯС, СВ=4 %
<b>Углеводный состав, г</b>			
Сахароза		0,54	0,64
Редуцирующие вещества	Фруктоза	2,66	3,19
	Глюкоза	15,97	19,16
	Мальтоза	21,30	25,55
	Ксилоза	0,54	0,64
Олигосахариды	Мальтотетразы	1,152	1,38
	Мальтотриазы	0,44	0,53
Полисахаридов-декстринов		5,89	7,06
<b>Общие химические показатели, %</b>			
М.д. сырой золы, %		0,03	0,40
М.д. кальция, % а.с.в.		0,04	0,04
М.д. калия, % а.с.в.		0,36	0,36
М.д. натрия, % а.с.в.		0,04	0,04
М.д. магния, % а.с.в.		0,05	0,05
М.д. фосфора, % а.с.в.		0,11	0,11
Содержание железа, %		0,44	0,53
М.д. белка (общий азот по Кьельдалю), %		2,91	3,49
М.д. жира, % а.с.в.		1,83	1,83
<b>Аминокислоты, г на 100 г:</b>			
Аспаргиновая кислота + аспаргин		0,168	0,202
Треонин		0,079	0,095
Серин		0,107	0,128
Глутаминовая кислота + глутамин		0,421	0,505
Глицин		0,143	0,172
Аланин		0,169	0,203

Продолжение таблицы 3

Цистеин	0,002	0,002
Валин	0,108	0,130
Метионин	0,029	0,035
Изолейцин	0,061	0,073
Лейцин	0,128	0,154
Тирозин	0,055	0,066
Фенилаланин	0,063	0,076
Гистидин	0,040	0,048
Лизин	0,086	0,103
Аргинин	0,093	0,112
Пролин	0,249	0,299
Триптофан	0,019	0,023
<b>Витамины, мкг</b>		
Рибофлавин В2	8,878	10,654
Пантотеновая кислота В5	35,49	42,588
Тиамин В1	4,45	5,340
Пиридоксин В6	6,88	8,256
Ниацин РР	415,88	499,056
Биотин Н	0,33	0,396

Т а б л и ц а 4 – Физико-механические свойства исследуемых порошков

Показатель	Образец			
	ПЯС	АЯС	ПЦ	АЦ
Влагосодержание до сушки, %	52,0	52,0	44,0	44,0
Влагосодержание после сушки, %	2,51	2,51	2,65	2,65
Объёмная масса, кг/м <sup>3</sup>	400 – 450	400 – 450	100 – 200	100 – 200
Угол естественного откоса, град.	48	45	49	46
Средний размер частиц, мкм	10 – 20	1050 – 2500	10 – 20	1050 – 2500

**В пятой** главе разработана установка для сушки и агломерации пищевых сред (пат. РФ № 2570536), произведён эксергетический анализ и создана система её автоматического управления. Предлагаемая установка позволяет: обеспечить эффективную агломерацию частиц продукта; необходимый рациональный режим агломерации при максимальном КПД; снизить энергозатраты на проведение процесса и интенсифицировать процессы сушки и агломерации.

В результате графической оптимизации при формоудерживающей способности стремящейся к единице, при диапазоне пластической прочности 400 – 600 кПа выявили область рациональных параметров технологии приготовления конфет типа пралине ( $K_{\text{ас}}=50\%$ ,  $t_{\text{ф}}=24 \dots 28\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\text{р}}=20 \dots 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (рисунок 8). Степень удовлетворения среднесуточной потребности в пищевых веществах при потреблении 100 г конфет разработанной рецептуры «Солодушка» и рецептуры «контроль» представлена в таблице 5.



Рисунок 8 – Структурная схема получения конфет типа пралине

Т а б л и ц а 5 – Степень удовлетворения среднесуточной потребности в пищевых веществах при потреблении 100 г конфет типа пралине

Пищевые вещества	Среднесуточная потребность в веществах	Степень удовлетворения формулы сбалансированного питания, %		
		Конфеты (контроль)	Конфеты «Солодушка»	
Белки, г	100	11,2	13,3	
Жиры, г	90	27,8	27,8	
Углеводы, г	80	45,3	38,1	
Минеральные вещества, мг:	- кальций	900	3,3	3,9
	- калий	3750	6,2	11,5
	- фосфор	1250	14,3	16,2
	- натрий	5000	12,6	14,9
	- железо	12,5	11,5	13,7
Энергетическая ценность, ккал	3009	20,2	17,2	

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан научно-практический подход к получению агломерированных порошков цикория и ячменного солода повышенной текучести с углом естественного откоса  $45 - 46^\circ$ , низкой объёмной массой  $100 - 200 \text{ кг/м}^3$ .

2. Исследованы и систематизированы физико-химические, реологические и теплофизические свойства концентратов цикория и ячменного солода, а также процессы плавления и кристаллизации жира лауринового КС-35 и кокосового масла методом дифференциально-сканирующей калориметрии.

3. Разработана математическая модель, позволяющая адекватно описывать осуществление процесса эффективной агломерации твёрдой дисперсной фазы в камере с жидкостно-капельным орошением распылительной сушилки.

4. Создана математическая модель конвективной сушки полидисперсных жидкой и твёрдой фаз агломератов, полученных после камеры жидкостно-капельного орошения распылительной сушилки, сопряжённая с математической моделью процесса агломерации, которая позволяет описать локальные характеристики гетерогенных потоков: температура, расход и т.д.

5. Определены рациональные параметры распылительной сушки концентратов цикория и ячменного солода и агломерации их порошков: влажность концентратов  $W_{ц} = 52,1 \%$ ,  $W_c = 44,0 \%$ , и температура сушильного агента  $t_{ц} = 171,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_c = 182,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , доля порошка для агломерации  $a_{ц} = 33,85 \%$ ,  $a_c = 46,0 \%$ , позволяющие снизить насыпную плотность готового порошка до  $\rho_{ац} = 160 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{ас} = 151 \text{ кг/м}^3$ , снизить энергозатраты до  $Q_{ц} = 0,576 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$ ,  $Q_c = 0,518 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$  при минимальной влажности готового продукта  $W_{сц} = 2,65 \%$ ,  $W_{сc} = 2,51 \%$ .

6. Исследованы и систематизированы физико-механические свойства полученных порошкообразных и агломерированных цикория и ячменного солода: углы естественного откоса, зависимости коэффициентов внутреннего и внешнего трения от напряжений сжатия; получены изотермы сорбции и установлены условия хранения для порошкообразных  $\phi'$  не более 50 %, для агломерированных  $\phi'$  не более 60 % или в герметичных крафт-мешках с полиэтиленовым вкладышем.

7. Разработана конструкция сушильной установки и система её автоматического управления, позволяющая повысить эксергетический КПД процессов сушки и агломерации на 2,1 % (патент РФ № 2570536, РК № 30569).

8. Исследованы физико-химические и реологические свойства конфетных масс типа пралине, определены оптимальные параметры получения, формования (24 – 28 °С) и резания (20 – 22 °С) конфетных жгутов при замене сахарной пудры на 50 % порошком ячменного солода. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая смоделировать эволюции температурных полей в жгутах конфет типа пралине при их охлаждении (свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ 201661683).

9. Установлено снижение энергетической ценности на 27,5 ккал в конфетах типа пралине «Солодушка» и повышение пищевой ценности за счет снижения углеводов на 5,9 %, увеличения белков на 2,1 %, витаминов на 0,074 – 93,573 мкг в 100 г, минеральных веществ К – 5,3 %, Са – 0,6 %, Р – 1,9 %, Na – 2,3 %, Fe – 2,2 %, что обеспечивает степень удовлетворения суточной потребности в пищевых веществах при потреблении 100 г конфет по белкам на 13 %, по жирам – 27,8 %, по углеводам – 38,1 %, по кальцию – 3,9 %, по

калию – 11,5 % по фосфору – 16,2 %, по натрию – 14,9 %, по железу – 13,7 %.

10. Проведена промышленная апробация производства порошка ячменного солода на ОАО «Молоко» г. Валуйки и утверждены ТУ 9190-391-02068108-2016, ТИ 9190-391-02068108-2016; производства конфет типа пралине с применением агломерированного ячменного солода на ОАО «Кондитерский комбинат «Кубань» г. Тимашевск; утверждены ТИ 9120-399-02068108-2017 и РЦ пралиновой массы с агломерированным ячменным солодом (годовой экономический эффект составляет 4698 тыс. р. при производстве 2088 т в год). Разработаны ТУ-9190-398-02068108-2017, ТИ-9190-398-02068108-2017 и РЦ для агломерированного цикория (годовой экономический эффект составляет 15 000 тыс. р. при производстве 6195,56 т в год). Разработаны ТУ-9190-397-02068108-2017, ТИ-9190-397-02068108-2017 и РЦ для агломерированного ячменного солода (годовой экономический эффект составляет более 20 900 тыс. р. при производстве 6391,56 т в год).

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$t$  – температура, °С;  $\gamma$  – градиент скорости сдвига,  $\text{с}^{-1}$ ;  $W_K$  – влажность концентрата, %;  $t_n$  – температура начальная, °С;  $t_p$  – температура пика, °С;  $t_k$  – температура конечная, °С;  $\Delta T$  – изменение температуры, К;  $\Delta t$  – изменение температуры, °С;  $\Delta \alpha$  – изменение степени превращения;  $\Delta m$  – изменение массы, %;  $E_C$  – энергия активации, Дж/моль;  $i$  – тепловой эффект, Дж/мг;  $k_1$  – кинетический коэффициент образования жидкой плёнки на сухих частицах;  $k_2$  – кинетический коэффициент образования агломератов;  $z$  – координата в направлении закрученного потока, м;  $C_A$  – концентрация твёрдых частиц в камере сушилки;  $t'$  – время, с;  $C_B$  – концентрация жидких расплывлённых частиц;  $C_S$  – концентрация частиц с жидкой плёнкой на поверхности;  $C_C$  – концентрация агломерированных частиц;  $W_{\text{ц}}$  – влажность концентрата цикория, %;  $W_C$  – влажность концентрата ячменного солода, %;  $a_{\text{ц}}$  – доля высокодисперсной фракции для агломерации цикория, %;  $a_C$  – доля высокодисперсной фракции для агломерации ячменного солода, %;  $t_{\text{ц}}$  – температура сушильного агента при сушке КЦ, °С;  $t_C$  – температура сушильного агента при сушке КЯС °С;  $W_p$  – равновесная влажность продукта, %;  $w$  – влагосодержание, %;  $\rho_{\text{ац}}$ ,  $\rho_{\text{ас}}$  – объёмная масса агломерированного цикория и солода,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W_{\text{сц}}$  – влажность высушенного цикория, %;  $W_{\text{сС}}$  – влажность высушенного ячменного солода, %;  $Q_{\text{ц}}$ ,  $Q_C$  – энергозатраты на сушку концентратов цикория и ячменного солода  $\text{кВт}\cdot\text{ч/кг}$ ;  $\varphi'$  – относительная влажность воздуха, %;  $K_{\text{зас}}$  – доля сахарного песка, замещенного на АЯС в конфетах, %;  $t_{\text{ф}}$  – температура формирования жгутов конфет, °С;  $t_p$  – температура резания, °С;  $P^{**}$  – пластическая прочность,  $\text{кПа}$ ;  $ПГ$  – текущее значение массы, %.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

### **Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ**

1. Магомедов, Г.О. Исследование гигроскопических свойств порошкообразных полуфабрикатов концентрата квасного суслу, солодового экстракта ячменя и экстракта цикория // Г.О. Магомедов, С.В. Шахов, М.Г. Магомедов, И.А. Саранов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2015. - № 4 - С. 17-21.

2. Магомедов, Г.О. Исследование динамической вязкости концентратов ячменного солода и цикория / Г.О. Магомедов, В.К. Кочетов, А.А. Смирных, И.А. Саранов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2016. - № 3. - С. 11 - 17.

3. Саранов, И.А. Математическая модель агломерации твердой дисперсной фазы в циклоне с жидкостно-капельным орошением / И.А. Саранов, Г.О. Магомедов, В.И. Рязских, С.В. Шахов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2016. - № 4. - С. 49 - 55.

4. Магомедов, Г.О. Порошок из солодового ячменного концентрата для производства пралиновых конфет пониженной сахароёмкости / Г.О. Магомедов, И.В. Плотникова, М.Г. Магомедов, И.А. Саранов, В.К. Кочетов // Кондитерское производство. - 2016. - № 6. - С. 27 - 30.

### **Патенты на изобретения**

5. Пат. 2570536 РФ, МПК F26B17/10(2006.01), 3/12 (2006.01). Установка для сушки и агломерации пищевых сред / Магомедов Г.О., Магомедов М.Г., Шахов С.В., Саранов И.А., Мурусидзе С.С.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. инж. технол. - № 014135829/06; заявл. 02.09.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34.

6. Пат. 30569 РК, Установка для сушки и агломерации пищевых сред / Матеев Е.З., Жумабекова З.А., Магомедов Г.О., Магомедов М.Г., Шахов С.В., Саранов И.А., Панков С.Н.; заявитель и патентообладатель Матеев Есмурат Зиятбекович. - 2014/1751.1; заявл. 26.11.2014; опубл. 16.11.2015, Бюл. № 11.

### **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

7. Программа для моделирования эволюции температурных полей в кондитерском жгуте при его охлаждении / Магомедов Г.О., Кочетов В.К., Саранов И.А., Журавлев А.А., Хвостов А.А., Магомедов М.Г. Свидетельство Роспатента о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016616835; заявл. 04.05.2016; зарегистр. 04.05.2016.

### **Статьи и материалы конференций**

8. Исследование термопластических характеристик солодовенного экстракта ячменя, концентрата квасного суслу и экстракта цикория [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2016/1707/17827/>. - Заглавие с экрана. - (Дата обращения: 20.03.2016).

9. Саранов, И.А. Совершенствование процесса гранулирования пищевых порошкообразных полуфабрикатов комбинированным способом / И.А. Саранов, Г.О. Магомедов // Материалы ЛП отчетной научной конференции за 2013 год: В 3 ч. Ч.1. - Воронеж: ВГУИТ, 2014. - С. 147.

10. Магомедов, Г.О. Установка для агломерирования пищевых порошкообразных полуфабрикатов комбинированным способом / Г.О. Магомедов, М.Г. Магомедов, С.В. Шахов, И.А. Саранов, И.А. Безбородых // Современные наукоемкие технологии. - 2014. - № 6. - С. 69 - 70.

11. Магомедов, Г.О. Установка для инстантирования порошкообразных полуфабрикатов комбинированным способом / Г.О. Магомедов, М.Г. Магомедов, С.В. Шахов, И.А. Саранов, С.Н. Панков; под общ. ред. проф. С.Ю. Панова // Материалы интернет-конференции «Машины и аппараты XXI века. Химия. Нефтехимия. Биотехнология» - Воронеж: ВГУИТ, 2014. - С. 104-107.

12. Магомедов, Г.О. Полупромышленная установка для инстантирования пищевых порошкообразных полуфабрикатов / Г.О. Магомедов, М.Г. Магомедов, С.В. Шахов, И.А. Саранов, С.Н. Панков // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы образования и науки». - 2014. - № 6. - С. 69 - 70.

13. Саранов, И.А. Разработка установки для агломерирования пищевых порошкообразных полуфабрикатов комбинированным способом / И.А. Саранов, Г.О. Магомедов, С.В. Шахов // Сборник докладов конференции «Инновационные технологии на базе фундаментальных научных разработок - прорыв в будущее». - Воронеж: Воронежский ЦНТИ, 2014. - С. 186 - 190.

14. Саранов, И.А. Разработка установки для агломерирования пищевых порошкообразных полуфабрикатов комбинированным способом / И.А. Саранов, Г.О. Магомедов, С.В. Шахов // Сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика». Часть 3 (9-3). - 2014. - № 4. - С. 242-246

15. Саранов, И.А. Гранулирование порошкообразного концентрата кислого сула / И.А. Саранов, М.Г. Магомедов, С.В. Шахов // Международный журнал экспериментального образования. - 2015. - № 4-2. - С. 400-401.

16. Саранов, И.А. Совершенствование процессов агломерации при инстантировании пищевых порошкообразных полуфабрикатов / И.А. Саранов, С.Н. Панков, С.В. Шахов // Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». В 4 томах - Курск, 2015. - С. 49-53.

---

Автор благодарит за консультации, помощь на разных этапах выполнения работы Шахова С.В., Магомедова М.Г., Журавлёва А.А., Рязских В.И., Смолко Ю.Н., Куцову А.Е.

Подписано в печать 30.03.2017. Формат 60 ´ 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

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

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

Отдел полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

Адрес университета и отдела полиграфии:

394036, Воронеж, пр. Революции, 19