

Федеральное агентство по рыболовству
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Астраханский государственный технический университет»

На правах рукописи



ГУБА ОКСАНА ЕВГЕНЬЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА СУШКИ
ЯИЧНЫХ ПРОДУКТОВ**

05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
АЛЕКСАНИЯ ИГОРЬ ЮРЬЕВИЧ

Астрахань – 2015

Оглавление

Оглавление	2
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ЯИЧНЫЕ ПРОДУКТЫ: ХАРАКТЕРИСТИКА, ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА	12
1.1 Общая характеристика яичных продуктов	12
1.2 Перспективы производства и области использования яичных продуктов	17
1.3 Анализ современных технологии переработки яичных продуктов	21
1.4 Анализ перспективных способов и конструкторских решений для сушки яичных продуктов	25
ГЛАВА 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯИЧНЫХ ПРОДУКТОВ С ВОДОЙ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ, ГИГРОСКОПИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	38
2.1 Теплофизические и структурно–механические характеристики яичных продуктов	38
2.1.1 Исследование плотности яичных продуктов	39
2.1.2 Исследование удельной теплоемкости яичных продуктов	49
2.1.3 Исследование теплопроводности яичных продуктов	52
2.1.4 Исследование температуропроводности яичных продуктов	60
2.2 Механизм взаимодействия яичных продуктов с водой	64
2.3 Термодинамический анализ внутреннего массопереноса при взаимодействии яичных продуктов с водой	74
ГЛАВА 3. МЕХАНИЗМ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКЕ ЯИЧНЫХ ПРОДУКТОВ	81

3.1	Экспериментальное исследование процесса распылительной сушки яичных продуктов	82
3.2	Исследование кинетики распылительной сушки яичных продуктов	87
3.3	Анализ механизма внутреннего массопереноса при распылительной сушке яичных продуктов	100
ГЛАВА 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СУШКЕ ЯИЧНЫХ ПРОДУКТОВ		103
4.1	Анализ влияния основных факторов на удельную производительность при распылительной сушке яичных продуктов	103
4.2	Разработка рациональных комбинированных режимов сушки яичных продуктов	112
ГЛАВА 5. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ВЫСУШИВАЕМОЙ ЧАСТИЦЕ ПРИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКЕ ЯИЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА		120
ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ И ПРОЕКТНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ		129
6.1	Алгоритм разработки комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки	129
6.2	Распылительная сушилка для комбинирования рациональных режимов	130
6.3	Распылительная сушилка	133
6.4	Рекомендации по практическому использованию результатов исследований	134
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ		137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		140
ПРИЛОЖЕНИЯ		156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы. Пищевая промышленность Российской Федерации имеет колоссальный потенциал, что обусловлено наличием в регионах крупных сырьевых баз и обилия производимой сельским хозяйством продукции. С другой стороны, современное состояние пищевой отрасли России до недавнего времени характеризовалось спадом производства, разрывом производственных связей, недостаточным материально-техническим оснащением.

Для устойчивого развития и высокой конкурентоспособности продукции на внутреннем и внешнем рынках пищевая промышленность России нуждается в непрерывной реконструкции на основе внедрения новейшей техники и совершенствования традиционных и разработке новых безотходных, экологически безопасных технологий.

Перспективность развития пищевой промышленности Астраханской области очевидна, учитывая специфику региона являвшегося традиционно сельскохозяйственным и животноводческим краем.

Структура питания населения России в последнее время меняется, так как при повышении уровня жизни населения и снижении трудозатрат уменьшается и потребность в пище. Однако, потребность в белках, жирах, углеводах, витаминах, минеральных веществах и других важнейших элементах пищи остается на прежнем высоком уровне. Разнообразные яйцепродукты традиционно используются при производстве пищевых и кулинарных продуктов массового потребления.

Использование скоропортящихся и требующих создания специальных условий при транспортировке и хранении натуральных яичных продуктов в пищевых технологиях ограничено, так как усложняет организацию производства, а кроме того, в большинстве случаев, приводит к росту себестоимости товарной продукции при увеличении производственных рисков. Применение сухих порошковых форм яичных продуктов длительного хранения, экономически оправдано и технологически рационально, так как позволяет исключить ряд операций и упростить процессы хранения, подготовки сырья и полуфабрикатов к производству.

На сегодняшний день, промышленность поставляет на рынок различные сухие яйцепродукты: желток, белок, яичный порошок, в том числе ферментированные и/или с различными функциональными добавками. Это обуславливает для предприятий, использующих яйцепродукты в качестве сырья, возможности расширять ассортимент производимой продукции и совершенствовать технологии производства.

Традиционно для реализации процесса сушки в яйцеперерабатывающей промышленности применяют конвективные распылительные сушильные установки или сушилки с кипящим в потоке сушильного агента слоем инертных тел на поверхность которых распыляется продукт. Данные типы сушильного оборудования имеют высокий технический уровень, основывающийся на сформированной мощной машиностроительной и научно-технической базе.

При распылительной сушке продукт тонко диспергируется на частицы в поток теплоносителя, при этом существенно увеличивается поверхность контакта фаз и, как следствие, значительно повышается интенсивность тепломассообменных процессов. Специфические особенности сушки распылением обуславливают ряд характерных достоинств этого способа: высокое качество высушиваемого продукта и отсутствие его перегрева в результате интенсивного испарения и краткосрочного контакта с сушильным агентом; готовый порошок не требует измельчения и обладает высокой растворимостью и др.

Принимая во внимание увеличивающиеся объемы выпуска сухих яичных продуктов, очевидно, что внедрение рекомендаций по совершенствованию стадии сушки приведет к ощутимым экономическим выгодам производителей.

Проведение дополнительных комплексных исследований с целью выбора рационального способа и режимов обезвоживания, типа и конструктивных особенностей сушильного аппарата, обеспечивающих соответствующие технико-экономические показатели, актуально и требует научного подхода с учетом специфики технологии и свойств сырья и требований к конечной продукции.

Диссертационная работа выполнена в рамках Перечня критических технологий Российской Федерации, утвержденного Президентом Российской Федерации В.В. Путиным 21 мая 2006г. Пр-842 (п. «Технологии экологически безопасного ресурсосберегающего производства и переработки

сельскохозяйственного сырья и продуктов питания»), Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно – технологического комплекса России на 2007- 2012 годы» (распоряжение Правительства Российской Федерации от 6 июля 2006 г. № 977-р.), а также в соответствии с координационным планом Научно-исследовательской работы кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет» под руководством профессора, доктора технических наук Алексаняна Игоря Юрьевича.

Степень разработанности темы. Совершенствованию процессов сушки уделяется большое внимание, так как именно данная стадия достаточно энергоемка, а, следовательно, в значительной степени определяет стоимость готового продукта и, кроме того, оказывает существенное влияние на качественные показатели товарной продукции.

В развитие теории и техники сушки дисперсных материалов значительный вклад внесли отечественные и зарубежные ученые А.С. Гинзбург, А.В. Лыков, В.И. Муштаев, П.А. Ребиндер, П.Г. Романков, Б.С. Сажин, В.И. Попов, И.Т. Кретов, И.Ю. Алексанян, С.Т. Антипов, А.Н. Остриков, К.Г. Филоненко, В.М. Ульянов, Б.И. Леончик, В.Е. Куцакова, О. Кришер, М. А. Гришин, Г.В. Семенов и другие.

Как отмечается в ряде основополагающих трудов в области тепломассообмена и сушки распространенным приемом повышения эффективности распылительных сушилок, при уменьшении расхода сушильного агента, снижении энергозатрат и удельных габаритов сушильной камеры, считается повышение исходной температуры сушильного агента. Однако применительно к термолабильным продуктам, в частности, яичным продуктам этот прием повышения технико-экономических показателей сушильной установки вступает в противоречие с необходимостью обеспечения высокого качества конечных продуктов. Следовательно, сушку яичных продуктов следует выполнять, строго контролируя и регулируя все параметры процесса, включая температуру объектов обезвоживания.

Оценить поля температур в движущихся тонкодисперсных частицах при высокой интенсивности процесса промышленной распылительной сушки экспериментально невозможно. Очевидна необходимость реализации

математической модели тепломассопереноса с целью расчета температур в течение процесса сушки в каждой пространственной точке объекта обезвоживания.

В последние годы численной реализации математической модели тепломассопереноса посвящено много работ, среди которых следует отметить исследования И.Ю. Алексаняна, С.Т. Антипова, А.Н. Острикова, А.А. Шевцова и других. В частности, актуальны работы И.Ю. Алексаняна, посвященные разработке численно-аналитической методики определения коэффициентов молярного переноса пара и массопроводности в неизотермических условиях с учетом режима и кинетики обезвоживания, термодинамических параметров взаимодействия объекта сушки с водой, комплекса физико-химических свойств материала.

Способ, конструкция установки и режимы сушки должны приниматься на основе анализа результатов комплекса экспериментально-аналитических исследований по изучению физико-химических свойств объектов переработки и рационализации сушильного процесса, так как стадия сушки определяет функциональные свойства яичных продуктов, которые прямо влияют на их коммерческий успех.

Интерес представляют научные работы, направленные либо на разработку и внедрение рациональных конструкций распылительных сушилок позволяющих реализовывать на практике нестационарные аэродинамические режимы при сушке, либо разработку рекомендаций по модернизации действующей сушильной техники для увеличения производительности и термического коэффициента полезного действия.

Решение задач экономии энергии и повышения эффективности перерабатывающих предприятий при производстве сухих яичных продуктов, в частности, проведение дополнительных комплексных исследований с целью выбора рационального способа и режимов обезвоживания, типа и конструктивных особенностей сушильного аппарата, обеспечивающих соответствующие технико-экономические показатели, актуально и требует научного подхода с учетом специфики технологии и свойств сырья и требований к конечной продукции.

Цель работы и задачи исследований. Целью работы является совершенствование процесса сушки яичных продуктов путем комплексного

исследования процессов тепломассообмена, разработки рациональных режимов обезвоживания и конструкции сушильной установки.

В соответствии с поставленной целью решаются следующие задачи:

1. Определить перспективные направления совершенствования тепломассообмена при сушке яичных продуктов на основе анализа способов сушки и конструкторских решений для их осуществления с учетом энергетических затрат, интенсивности процесса и требований к сырью и качеству готового продукта.

2. Комплексно исследовать объекты сушки, изучив экспериментально и на основе обобщения известных литературных данных их морфологические, теплофизические и гигроскопические характеристики, а также проанализировав термодинамические закономерности статического взаимодействия яичных продуктов с водой.

3. Выявить особенности механизма внутреннего тепломассопереноса при сушке яичных продуктов на основе исследования кинетики сушки.

4. Экспериментально обосновать рациональные способы обезвоживания яичных продуктов и выявить влияние основных факторов на процесс сушки, получить расчетные зависимости кинетики влагоудаления и удельной производительности сушилки от влияющих факторов для их использования в инженерных расчетах при проектировании сушилок.

5. Разработать и численно реализовать математическую модель процесса распылительной сушки яичных продуктов для расчета эволюции температурных полей в продуктах при обезвоживании.

6. Разработать алгоритм получения комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки при активной нестационарной аэродинамической обстановке взаимодействия потоков в сушильной камере.

7. На основе анализа результатов комплекса проведенных экспериментально-аналитических исследований по интенсификации тепломассообмена с учетом целевого исследования данных научно-технической литературы предложить конструкторские решения для реализации разработанных режимов сушки.

8. Разработать рекомендации по практическому использованию результатов исследования.

Научная новизна. Получены уравнения зависимости гигроскопических, массовлагообменных и теплофизических характеристик яичных концентратов от влажности и температуры. Определены и математически описаны закономерности взаимодействия продуктов с водой на основе термодинамического анализа процесса сорбции. Установлены кинетические закономерности процесса распылительной сушки яичных продуктов, получены полиномиальные аппроксимирующие зависимости удельной производительности и кривых скорости от влияющих факторов и проведен комплексный анализ тепломассообменных процессов при обезвоживании. Определены факторы, влияющие на удельную производительность, установлены диапазоны их варьирования с учетом технологических ограничений. Выявлены особенности механизма внутреннего тепломассопереноса при сушке яичных продуктов. Проведен анализ эволюции температурных полей в продуктах при обезвоживании путем численной реализации математической модели тепломассопереноса при распылительной сушке яичных продуктов.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость диссертационного исследования обусловлена комплексным анализом тепломассообменных процессов при распылительной сушке яичных продуктов. Сформулированные теоретические положения и практические выводы могут быть использованы при организации научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на пищевых предприятиях.

Установлены рациональные режимы и соответствующие значения влияющих факторов для обеспечения максимальной удельной производительности при распылительной сушке яичных продуктов.

Разработан алгоритм получения комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки при активной нестационарной аэродинамической обстановке взаимодействия потоков в сушильной камере.

Предложена рациональная конструкция распылительной сушилки для эффективного обезвоживания яичных продуктов. Разработана конструкция установки для комбинирования рациональных режимов.

Основные результаты и рекомендации внедрены и используются при организации технологических процессов на ООО «АСТРАХАНСКАЯ

КОНСЕРВНАЯ КОМПАНИЯ», ООО НПП «Золотое зернышко», ООО НПП «пЕДАНт», ООО «АСТРБИОПРОДУКТ» и др.

Методология и методы диссертационного исследования. Теоретико-методологической основой исследований являются труды отечественных и зарубежных авторов в области теории и техники сушки, в частности, работы А.С. Гинзбурга, А.В. Лыкова и др.

Основой исследований является изучение кинетики процесса сушки яичных продуктов, а также термодинамический анализ статического взаимодействия воды с яйцепродуктами на основе опытных данных в комплексе с теоретическим анализом для интенсификации тепломассообмена, численного расчета температурных полей и реализации модели тепломассопереноса в процессе сушки с учетом динамики изменения свойств материала в реальном процессе.

Цель исследования достигнута, благодаря обобщению и анализу классических и новых аналитических и эмпирических методов изучения тепломассопереноса, на базе известных научных достижений и основополагающих работ в области обезвоживания пищевых продуктов, положениям которых соответствуют выводы и рекомендации, представленные в работе. Полученные зависимости и аппроксимирующие уравнения адекватны экспериментальным данным, что подтверждено статистической обработкой результатов измерений. Методическое обеспечение и предложенные в результате исследований конструкторские решения не противоречат известным апробированным методикам рационального проектирования и конструирования аппаратов. Комплекс экспериментов и реализация физико-математической модели процесса сушки проводилась с использованием современных компьютерных математических программ, приборов и оригинальных опытных установок.

Положения, выносимые на защиту:

- Функциональные зависимости теплофизических, структурно-механических и гигроскопических характеристик яичных продуктов от влажности и температуры продуктов для реальных диапазонов их изменения в процессе сушки.
- Расчетные зависимости скорости влагоудаления и удельной производительности сушилки от начальной температуры продукта температуры сушильного агента.

- Рациональные режимы сушки яичных продуктов.
- Алгоритм получения комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки.
- Конструкции распылительных установок для сушки жидких и пастообразных продуктов.

Апробация результатов диссертационного исследования. Основные результаты исследований доложены и обсуждены на научных конференциях: Международная отраслевая научная конференция профессорско-преподавательского состава АГТУ, посвященная 80-летию основания Астраханского государственного технического университета – АГТУ (Астрахань, 2010г.); Четвертая Международная научно–практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ–2011» (Москва, 2011г.); Всероссийская научная конференция профессорско-преподавательского состава Астраханского государственного технического университета (Астрахань, 2012г.).

ГЛАВА 1. ЯИЧНЫЕ ПРОДУКТЫ: ХАРАКТЕРИСТИКА, ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Общая характеристика яичных продуктов

Одним из основных продуктов птицеводства является яйцо. Большое разнообразие питательных веществ, содержащихся в яйце, делает его ценным питательным продуктом. Оно способствует поддержанию здоровья взрослого человека, усиливает рост и развитие детей, играет важную роль при лечении многих расстройств питания, включая витаминную недостаточность и различные виды малокровия. Ценность яиц в том, что в них содержатся полноценные белки и жиры, а также биологически ценные вещества.

Соотношение белка, желтка и скорлупы зависит от вида, возраста, породы и продуктивности, условий содержания и кормления. В яйцах кур содержится 6 весовых частей белка – 54-60 %, 3 желтка – 28-32 % и 1 часть скорлупы – 11-14 % [18,19,75,93,139,141 и др.]. В яйцах молодых кур содержится меньше желтка и больше белка, а с возрастом масса желтка увеличивается.

Основную массу съедобной части яйца составляет белок, который состоит из четырех неоднородных по плотности слоев: жидкого наружного – 23 %, плотного наружного – 57 %, жидкого внутреннего – 17 % и плотного внутреннего – 3 % [18,19,75,93,139,141 и др.].

Содержание плотного белка принято считать одним из основных показателей качества яиц, так как при хранении яиц белок постепенно разжижается и становится водянистым [18,19,75,93,139,141 и др.].

Наиболее важная часть в пищевом отношении – желток. Это густая масса, заключенная в тонкую прозрачную шарообразную оболочку неправильной формы. Цвет желтка обусловлен содержанием каротиноидов и может быть от бледно-желтого до темно-оранжевого. Желток состоит из чередующихся темно-желтых и светло-желтых слоев, а в центре желтка располагается более светлая часть – латембра [18,19,75,93,139,141 и др.].

Скорлупа – известковая оболочка, которая состоит из двух слоев: внутреннего, или сосочкового, составляющего одну треть скорлупы, и наружного,

или губчатого. Скорлупа пронизана многочисленными порами. Скорлупа предохраняет содержимое яйца от повреждений и служит источником минеральных веществ, которые расходуются на образование скелета. Цвет скорлупы зависит от вида и породы птицы [18,19,75,93,139,141 и др.]. Яичная скорлупа, внутренняя (яичная), наружная (подскорлупная) оболочки и кутикула с пористой структурой являются переплетенными, скрепленные белковым веществом, волокнами [73]. После снесения яйца, в нем на тупом конце образуется воздушная камера, размер которой, как важный качественный показатель, определяется проницаемостью скорлупы, продолжительностью и условиями хранения [72].

Химический состав является объективным показателем качества и питательной ценности яиц. Химический состав яиц птицы несколько различается и обобщен в таблице 1.1 [141]. В целом яйца любого вида сельскохозяйственной птицы состоят на 70-75% из воды, в которой содержатся растворенные минеральные вещества, углеводы, витамины, протеины и жиры в виде эмульсии.

Таблица 1.1 - Химический состав яиц птицы [141]

Вид птицы	Сухое вещество, всего, %	Вода, %	В том числе			
			Углеводы, %	Протеины, %	Жиры, %	Минеральные вещества, %
Куры	26,4	73,6	1,0	12,8	11,8	0,8
Индейки	26,3	73,7	0,7	13,1	11,7	0,8
Цесарки	27,2	72,8	0,8	13,5	12,0	0,9
Перепела	25,4	74,6	-	13,1	11,2	1,1
Утки	29,9	70,1	1,4	13,0	14,5	1,0
Гуси	29,6	70,4	1,3	13,9	13,3	1,1

Содержание сухого вещества по отношению к целому яйцу наибольшее в желтке – 45-48 %, затем в скорлупе с оболочками - 32- 35 % и в белке – около 20%. В желтке находится практически весь жир, жирорастворимые витамины. Калорийность 100 грамм желтка составляет 370 – 400 ккал, белка – 40 – 50 ккал [139,141].

Желток является основным источником питательных веществ и энергии в яйце, соотношение между размерами желтка и белка являются важным фактором, определяющим его пищевую ценность [83].

Яйца считаются также очень хорошим натуральным источником высокоценных жиров (в том числе и ненасыщенных жирных кислот) витаминов и минеральных веществ, в значительной степени обеспечивающих ежедневную потребность человека. Употребление одного яйца покрывает суточную потребность взрослого человека в протеине на 10 %, витаминах и микроэлементах: рибофлавине – 15%, В12 – 8%, А – 6%, фолиевой кислоте (В 6) – 4%, Е – 3%, тиамине – 2%, цинке и железе – 4%, селене – 10%.

Исследования последних лет убедительно свидетельствуют о том, что количество потребляемых яиц не имеет прямой связи с уровнем холестерина в крови. Напротив, яйца полезны для поддержания сердечной деятельности благодаря присутствию в них лецитина, который препятствует накоплению холестерина в организме человека.

В зависимости от качественных показателей яйца классифицируются следующим образом: пищевые, пищевые неполноценные и технический брак.

Пищевые – свежие доброкачественные яйца с чистой скорлупой, без механических повреждений, с высотой воздушной камеры не более 13 мм; с плотным, просвечивающимся, вязким белком; с желтком чистым, вязким, равномерно окрашенным в желтый или оранжевый цвет. Пищевые яйца подразделяют на диетические и столовые. Диетическими считаются яйца, хранившиеся не более 7 суток, не считая дня снесения. После истечения этого срока их по акту переводят в столовые.

Основные показатели качества яиц: масса; чистота и целостность скорлупы; состояние и величина воздушной камеры; консистенция внутренних фракций яйца; положение и подвижность желтка. Яйца, имеющие различного рода дефекты, подразделяют на неполноценные (пищевые отходы) и непригодные в пищу (технический брак). Пищевые неполноценные яйца направляют на промышленную переработку.

При хранении в яйцах происходят необратимые процессы, снижающие их пищевые качества. За счет испарения воды увеличивается воздушная камера,

разжижается белок, наблюдается смещение желтка. Во время хранения яйца могут приобретать неприятный запах плесени, затхлости. При длительном хранении белок яйца теряет свои бактерицидные свойства, поэтому в яйце может происходить размножение микробов, грибов, накопление токсических веществ.

Яичные продукты вырабатывают в виде жидких и сухих яичного меланжа, яичного желтка и яичного белка. Яичные продукты должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 53155-2008 «Продукты яичные жидкие и сухие пищевые. Технические условия» и вырабатываться в соответствии с технологической инструкции по выработке пищевых яичных продуктов, которая разработана и утверждена ГУ ВНИИПП в 2008 г. с соблюдением требований, установленных нормативными правовыми актами Российской Федерации. Сухие яичные продукты изготавливают следующих видов: яичный порошок – обезвоженная смесь желтка и белка яиц в естественном соотношении; белок яичный сухой; желток яичный сухой. По органолептическим показателям яичные продукты должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Органолептические показатели яичных продуктов

Наименование показателя	Характеристика яичного продукта	
	Жидкого	Сухого
Внешний вид и консистенция	Однородный продукт без посторонних примесей	
	Без остатков скорлупы, пленок, твердый в замороженном состоянии, жидкий в охлажденном и размороженном состоянии, при этом желток — более густой	Порошкообразный или в виде гранул, комочки легко разрушаются при надавливании пальцем
Цвет: - меланжа и желтка - белка	От желтого до оранжевого От светло-желтого до светло-зеленого	От светло-желтого до оранжевого От белого до желтоватого
Запах и вкус	Свойственный яичным продуктам, без посторонних	

По физико-химическим показателям яичные продукты должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Физико-химические показатели яичных продуктов

Наименование показателя	Норма для яичного продукта					
	жидкого			сухого		
	меланжа	белка	желтка	меланжа	белка	желтка
Массовая доля, %, не менее: сухого вещества	23,5	11,5	43,0	95,0	92,0	95,0
жира	10,0	—	26,0	38,0	—	53,0
белковых веществ	10,0	11,0	15,0	45,0	85,0	35,0
Массовая доля свободных жирных кислот в жире, в пересчете на олеиновую, %, не более	—	—	—	3,5	—	3,5
Растворимость, %	—	—	—	Не менее 85,0	Не менее 90,0	Не более 40,0
Концентрация водородных ионов, рН	Не менее 7,0	Не менее 8,0	Не менее 5,9	—	—	—
Альфа-амилазный тест	Отрицательный					
Посторонние примеси	Не допускаются					

Справочные сведения о пищевой и энергетической ценности в 100 граммах яичного пищевого продукта приведены в таблице 1.4.

Согласно требованиям ГОСТ Р 53155-2008 яичные продукты хранят в сухих, чистых и хорошо вентилируемых помещениях. Срок годности и условия хранения устанавливает изготовитель.

Рекомендуемые сроки годности, начиная с даты выработки:

- Сухих яичных продуктов: при температуре не выше 20°C - не более 6 мес.; при температуре не выше 4°C – не более 24 мес.
- Жидких охлажденных яичных продуктов: при температуре не выше 4°C – не более 24 часов, в том числе на предприятии-изготовителе, не более 6 часов с момента окончания технологического процесса;

- Жидких замороженных яичных продуктов: при температуре не выше минус 18°С – не более 15мес.; при температуре не выше минус 12°С – не более 10мес.

Таблица 1.4 - Пищевая и энергетическая ценность яичных продуктов

Наименование продукта	Белок, г, не менее	Жир, г, не менее	Энергетическая ценность, ккал
Сухие яичные продукты:			
яичный белок	85,0	—	340,0
яичный желток	35,0	53,0	617,0
яичный меланж	45,0	38,0	522,0
Жидкие яичные продукты:			
яичный белок	11,0	—	44,0
яичный желток	15,0	26,0	294,0
яичный желток	15,0	26,0	294,0

Очевидно, что производство сухих яичных продуктов перспективно, так как позволяет ликвидировать потери яиц, связанные с боем, усушкой и порчей в процессе хранения, снижает требования к упаковке, облегчает транспортировку, а также позволяет значительно сократить потребность в складских помещениях и холодильниках.

1.2 Перспективы производства и области использования яичных продуктов

Современная яйцеперерабатывающая промышленность производит и поставляет на рынок разнообразные яйцепродукты: сухой белок, желток и яичный порошок, в т.ч. с различными функциональными добавками.

Яйцепродукты являются основным компонентом в кулинарии и пищевой промышленности, учитывая их высокую питательную ценность, пенообразующую способность, и способность образовывать стойкие эмульсии в процессе взбивания, благодаря высокой вязкости.

Способность яиц к восстановлению объема после сжатия приводят к получению эластичных продуктов с нежной консистенцией, что повышает потребительский спрос.

Яйцепродукты востребованы не только в пищевой, но и других промышленных отраслях, в частности, в медицине и фармацевтике (получение бактериальных сред, лекарственных препаратов), при производстве мазей и кремов в косметической индустрии, в лито- и полиграфии при производстве красителей и придания светочувствительности и т.д.

Яйца и яйцепродукты оказывают положительное функциональное влияние на биохимические и биологические процессы [3,6] в организме человека, вследствие содержания в них антител IgY, бетаина G2 и G3 глобулинов, связанной линолевой, олеиновой и фолиевой кислот, каротиноидных пигментов, лизоцима, овомакроглобулина и овальбумина, минорных стеролов лецитина, в том числе с витамином B12, что позволяет классифицировать их, как компонент здоровой пищи [91].

Определение новых функциональных биологических свойств яйцепродуктов (белков и их производных) позволит разрабатывать оригинальные методы увеличения пищевой ценности яиц, являющихся источником биологически активных веществ, которые имеют важное значение при профилактике и лечении инфекционных и хронических болезней [98].

Анализ пищевой промышленности различных стран мира показывает, что промышленное производство яйцепродуктов напрямую зависит от уровня научных исследований в области изучения характеристик и способов переработки куриного яйца, которые имеют сложившиеся мировые тенденции развития [5,74].

Индекс биологической ценности усвояемого (98-97%) протеина в яйце, содержащего в основном простые протеины, состоящие из аминокислот равен 100 (данные Всемирной организации здравоохранения), что выгодно отличает его от молочного белка – индекс 88 – 91, протеина бройлерного мяса – индекс 75 – 80, белка сои – индекс 59 – 74. Превалирующей частью белка являются глобулины и альбумины (50-75%), которые, легко перевариваются и усваиваются организмом человека, причем нативный альбумин усваивается на 70%, а после денатурации на 97,5% [136]. Аминокислотные составы в белке и желтке равнозначные [150].

Усваиваемый организмом индивидуума на 95% [39] желток обогащен 12 жизненно необходимыми витаминами (h, D, B9, B1, B2, B12, Л, F, К), для организма человека и микроэлементами (хлор, натрий, калий, кальций, фосфор, железо, магний, сера).

Ввиду перспективности расширения ассортимента и развития технологий яйцепродуктов в 2001 году впервые в Европе организована международная яичная Программа. COST 923, объем финансового обеспечения которой составил 20 млн. евро, по исследованию куриного яйца для создания оригинальных способов производства продуктов функционального питания, а также применения яйцепродуктов в областях промышленности, не связанных с пищей. Кроме того, в США под патронажем Объединения производителей яиц и Американского совета по яйцу (с 1984г. в Вашингтоне) функционирует Центр изучения питательности яиц (tgg Nutrition Center - fcNC) [1,2], координирующий свою работу с правительством, СМИ и организациями, решающими задачи здорового питания, в результате чего разработаны «Диетические рекомендации для американцев», которые определяют вектор формирования государственных программ.

На пищевом рынке популярными, разработанные в рамках Бельгийской национальной программы, становятся яйца Columbus, с высоким содержанием протеинов, витаминов и минералов, с совершенным жировым балансом и заданными характеристиками, вследствие специфического вегетарианского рациона кормления кур [45].

В университете Новой Англии (Австралия), Национальным центром исследования яиц создано «новое яйцо» (New Start egg) с улучшенными функциональными свойствами. [16].

Британский совет по яичной промышленности (BtlC) совместно с Фондом научных и образовательных исследований, Европейской ассоциацией переработчиков яиц, Международной комиссией по яйцу, Испанским Институтом исследования яйца (Instituto de fcstudios del Huevo), Канадское агентство по маркетингу яйца, Швейцарское объединение производителей (Gallo Suisse) решают ряд задач по обеспечению яичного жизненного цикла для реализации товарного яйца на основе научного обеспечения производства и переработки с учетом стандартизации и хранения [79].

В РФ на каждого индивидуума в год производится примерно 260 штук яиц и имеется устойчивая тенденция к росту при расширении областей использования яйцепродуктов, в частности, в косметической, медицинской, фармацевтической, и других отраслях промышленности [160], однако наблюдается значительное отставание от стран ЕС и США (страны ЕС – 20 – 25% мирового объема яйцепродуктов, США – 30 – 35%, а РФ – 7 – 10% [163]). Причины отставания связаны с пробелами при производстве пищевой продукция 2-ой подгруппы и продукции, не связанной с пищей [158].

Очевидно, что для отечественного рынка рациональным путем развития является переход от реализации нативных яиц к производству и продаже яйцепродуктов на базе глубокой комплексной переработки яиц, что может привлечь инвестиции в разработки и привести к продвижению высокоэкономичных проектов [124].

Яйцепродукты являются основой функционального, лечебно-профилактического и детского питания, поэтому разработка ассортимента продуктов с оригинальными свойствами, при их обогащении витаминами, минеральными элементами, уменьшении холестерина и т.п. актуальна [125] и требует разработки оригинальных энергосберегающих и экологически безопасных технологий по следующему алгоритму:

- изучение характеристик компонентов яйца при их глубоком разделении в целях улучшения пенообразующих, эмульгирующих и гелеобразующих свойств;
- модификация яйцепродуктов с использованием специфических препаратов для улучшения или создания новых функциональных особенностей;
- качественный анализ готовых яйцепродуктов и полуфабрикатов на базе определения связи между их потребительскими свойствами и влияющими факторами, такими как доля свободных жирных кислот, рН, растворимость, консистенция, органолептические показатели, режимные параметры процессов технологической цепочки производства и т. д.;
- создание новых или оригинальных типов яйцепродуктов [78];
- изучение комплекса характеристик и свойств компонентов яиц для реализации их в технологиях известных и нетрадиционных для яйцепродуктов

отраслях индустрии: пищевой, кормовой масложировой, кондитерской, хлебопекарной и т. п. с целью повышения потребительского спроса [119].

В пищевой промышленности делается акцент на изготовление продуктов переработки яиц, как в жидком, так и в сухом виде, что обусловлено сезонностью спроса, и ведет к искусственному снижению спроса и цены на яичную продукцию. Таким образом, производство яичного порошка различного состава в упаковке при сохранении заданных свойств при хранении экономически оправдано. [1,2,95].

Потребительские характеристики готовых продуктов при добавлении обезвоженных яйцепродуктов вместо нативных яиц повышаются, как и их функциональные свойства, в частности, уменьшается черствение мучных изделий, повышается микробиологическая безопасность и т. д. [4].

Структура питания населения РФ в настоящее время претерпевает значительные изменения, т.к. при снижении трудозатрат, очевидно, уменьшается и потребность в пище. Однако, потребность в основных элементах пищи (белках, минеральных веществах, жирах, витаминах и др.) остается на прежнем высоком уровне. Важное место в структуре питания принадлежит разнообразным яйцепродуктам, которые используются при производстве всевозможных соусов, кетчупов, майонезов; мясных и колбасных изделий; хлебобулочных и кондитерских изделий; мороженого; блинчиков, омлетов; продуктов для спорта, протеиновых коктейлей и др.

Однако использование натуральных яичных продуктов существенно усложняет организацию производства продукции, резко увеличивает микробиологическую опасность, в то время как применение сухих яичных продуктов позволяет исключить ряд операций и существенно упростить процесс подготовки сырья к производству.

1.3 Анализ современных технологии переработки яичных продуктов

Прогрессивными являются технологии глубокой переработки яиц, которые включают в себя производство сухих яичных продуктов, что позволяет минимизировать потери яиц в процессе хранения. Производство сухих яичных продуктов обеспечивает сокращение затрат на транспортировку и позволяет

существенно сократить потребность в складских помещениях, а также снизить требования к упаковке и осуществлять длительное хранение без создания специальных условий и пониженных температур.

Технологический процесс производства сухих яичных продуктов состоит из следующих основных операций:

- приемка, сортировка и санитарная обработки яиц;
- разбивание и извлечения содержимого яиц;
- разделение на белок и желток (при производстве меланжа без разделения);
- накопление, фильтрация, перемешивание, пастеризация (при необходимости);
- сушка, охлаждение порошка;
- фасовка, хранение.

Соблюдение специальных санитарно-гигиенических правил внимательным образом учитывается при организации всех технологических операций: воздух в производственных цехах перед началом работ очищают от пыли пульверизацией; технологическое и вспомогательное оборудование промывают и стерилизуют; пол и стены ежедневно после работ моют и дезинфицируют и т.д.

Содержимое яйца является питательной средой для размножения различных микроорганизмов. Получить продукцию регламентированного и высокого качества можно только при переработке яиц с чистой скорлупой. Обработка яиц по технологической инструкции не всегда эффективна, так как на практике возможно проникновение микроорганизмов с поверхности скорлупы в содержимое яиц еще до санитарно-гигиенической обработки. Перед приготовлением сухих яичных продуктов, яйца проходят санитарную обработку (мойка, сушка и дезинфекция). Дезинфицируют яйца преимущественно озоном, а необходимость мытья продиктована наличием источников размножения микрофлоры – приставших частичек подстилки, помета, слизи. Яйца до мойки замачивают в воде (30 мин. при температуре воды 25 – 28°C) с добавлением хлорной извести (содержание активного хлора 0,1 – 0,2%). Далее чистые, после дезинфекции и просушки яйца поступают в технологический узел разбивания.

Разбивание яиц и отделение от скорлупы осуществляется с помощью специального оборудования или вручную. При необходимости отделяют белок от желтка и осуществляют визуальный контроль яичной массы. При ручном разбитии, содержимое яйца выливается в индивидуальную емкость – чашечку и в случае обнаружения дефектов в белке и/или желтке оператор сливает яичную массу, производит смену ножа и чашечки. В агрегатах для разбития яиц также предусмотрено отделение белка от желтка. Содержимое яйца выливается в чашечку, желток остается на поверхности, а белок отбирается через дренажные отверстия в специальную емкость.

Для удаления частиц скорлупы, градинки и подскорлупных оболочек, яичную массу фильтруют и одновременно перемешивают.

Для сушки яичных продуктов применяют конвективные распылительные сушильные установки или сушилки с кипящим в потоке сушильного агента слоем инертных тел, на поверхность которых распыляется продукт.

При распылительной сушке продукт диспергируется в поток теплоносителя, при этом существенно увеличивается поверхность контакта фаз и, как следствие, значительно повышается интенсивность тепломассообменных процессов. Достоинства распылительной сушки: высокое качество высушиваемого продукта и отсутствие его перегрева в результате интенсивного испарения и краткосрочного контакта с сушильным агентом; готовый продукт не требует дополнительного измельчения и обладает высокой растворимостью и др.

Из дисковых сушилок наибольшее распространение получили сушилки с паротурбинным приводом. Основным узлом сушилки является распылительный диск с соплами. Продукт на сушку поступает через отверстие в верхней части диска и за счет действия центробежной силы отбрасывается к периферии диска, а далее выходит через каналы и сопла в сушильную камеру. Скорость отрыва капли достигает 160 м/с и встречая сопротивление сушильного агента с температурой 140 – 160°С, капля дробится на частицы. При данной организации процесса распыления поверхность 1 литра продукта составляет 120 – 300м². Благодаря развитой поверхности соприкосновения частиц продукта с сушильным агентом и значительному различию температур между ними достигается мгновенная сушка продукта. Производительность промышленных дисковых сушилок составляет 300

– 500кг/ч. На малотоннажных предприятиях используют сушилки с акустическими или пневматическими форсунками, производительностью 50 – 70кг/ч.

Для обеспечения высокого качества яичных продуктов определяющее значение имеет режим сушки. Яичную массу нельзя нагревать в процессе сушки выше температуры, при которой происходит денатурация белков 52-60°C. Кроме того, чтобы растворимость порошка была высокой, температуру яичной массы не рекомендуется превышать 48 – 50°C.

Предел тепловой белковой коагуляции белка можно повысить, добавляя органические кислот или соли. При развитии реакции Майяра уменьшается пищевая белковая ценность, что обуславливает специфическую обработку яйцепродуктов перед обезвоживанием путем ферментирования яичной массы и ее обезсахаривания известными методами [15], в целях сохранения промышленной ценности яиц и увеличения срока хранения яйцепродуктов в сухом виде. Для производства качественного яичного порошка применяют столовые свежие яйца, при сроке хранения менее 20 дней [148]. Для безопасности яйцепродуктов проводится термообработка при рациональных режимах [76].

Компонентный состав и питательная ценность сухих яичных продуктов практически не отличается от нативных яиц. Однако режимы сушки определяют восстанавливаемость яйцепродуктов перед их практическим использованием [138]. Во избежание карамелизации белка при обезвоживании, приводящей к увеличению содержания глюкозы в порошковых яйцепродуктов и снижению их качества, яичную массу ферментируют глюкозооксидазой в присутствии фермента каталазы [46,76].

Важным преимуществом сухих яичных продуктов, по сравнению с другими формами конечных продуктов яйцепереработки, является то, что при производстве сухого порошка микроорганизмы погибают во время сушки яичной массы, а возможно оставшиеся не развиваются во время хранения готового продукта, имеющего низкую влажность.

Между технологией переработки, методом сушки и качеством яичного порошка существует взаимосвязь. Микробиологическое состояние конечного продукта напрямую зависит от качества исходного сырья, санитарно-гигиенических условий производства и др. При применении свежей яичной массы,

ее немедленной гомогенизации, фильтрации, пастеризации и сушке до 95% яичный порошок будет соответствовать микробиологическим требованиям.

Важным требованием химического состава сухих яичных продуктов является влажность. Влажность регламентируется и с одной стороны не должна превышать показателей ГОСТ Р 53155-2008 «Продукты яичные жидкие и сухие пищевые. Технические условия», а с другой стороны определяет энергорзатраты на сушку и производительность по готовому продукту. Несомненно, что при полном обезвоживании яичного порошка производство будет неэкономичным. Чем выше влажность порошка, тем больший его выход, но возникает опасность роста микрофлоры при хранении.

При использовании сухого яичного порошка в производственной практике, основным требованием считается его растворимость в воде. Регулирование растворимости – сложная производственная задача. Растворимость зависит от температуры продукта в процессе пастеризации и сушки, то есть при производстве конкурируют два взаимозависимых параметра: выше растворимость, но выше и обсемененность – повышаем температуру переработки, снижается растворимость.

Важный показатель яичного порошка – кислотность, которая главным образом определяется качеством перерабатываемой яичной массы.

Таким образом, способ, конструкция установки и режимы сушки должны приниматься на основе анализа результатов комплекса экспериментально-аналитических исследований по изучению физико-химических свойств объектов переработки и рационализации сушильного процесса, так как стадия сушки определяет функциональные свойства яичных продуктов, которые прямо влияют на их коммерческий успех.

1.4 Анализ перспективных способов и конструкторских решений для сушки яичных продуктов

Конструктивные особенности и аппаратное оформление установок распылительной сушки обусловлено технологическими требованиями, физико-химическими свойствами, типом распылителя, производительностью по испаренной влаге и т.п.

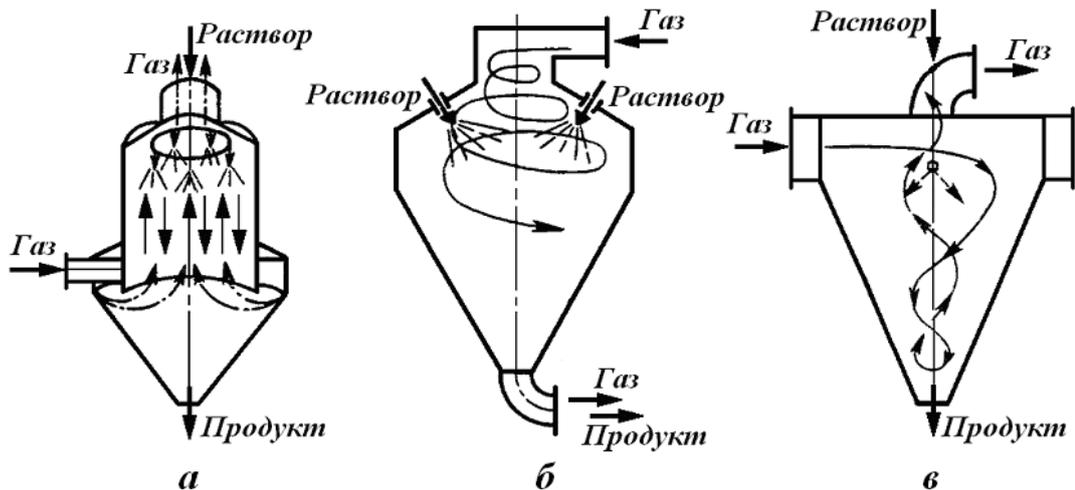


Рисунок 1.1 - Схемы камер распылительных сушилок:

а – с противоточным движением потоков и форсуночным распылом; б – с центральным закрученным подводом теплоносителя (прямоток) и форсуночным распылом; в – с закрученным тангенциальным подводом теплоносителя

Помимо отличий, обусловленных методом распыла жидкости, на конструкцию сушилки влияет способ газоподвода. На рисунке 1.1, 1.2 и 1.3 приведены несколько типовых схем распылительных сушильных установок, применяемых в промышленности.

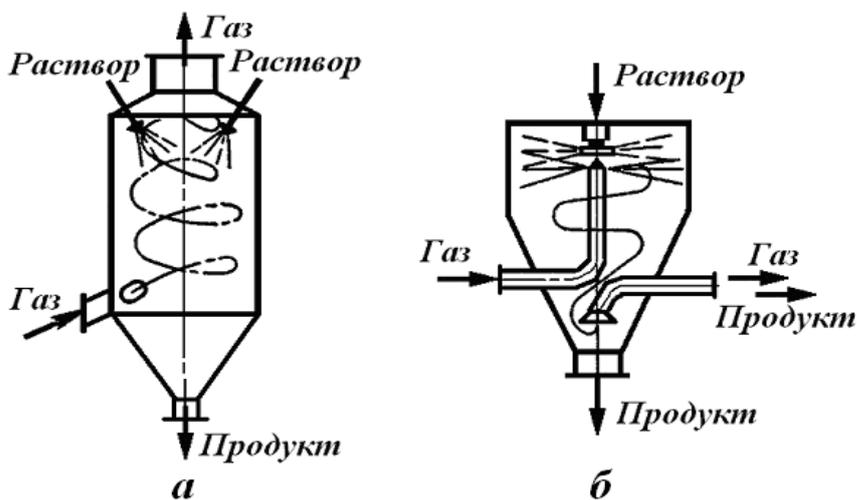


Рисунок 1.2 - Схемы камер распылительных сушилок:

а – с тангенциальным подводом теплоносителя (противоток) и форсуночным распылом;
б – с дисковым распылом (противоток).

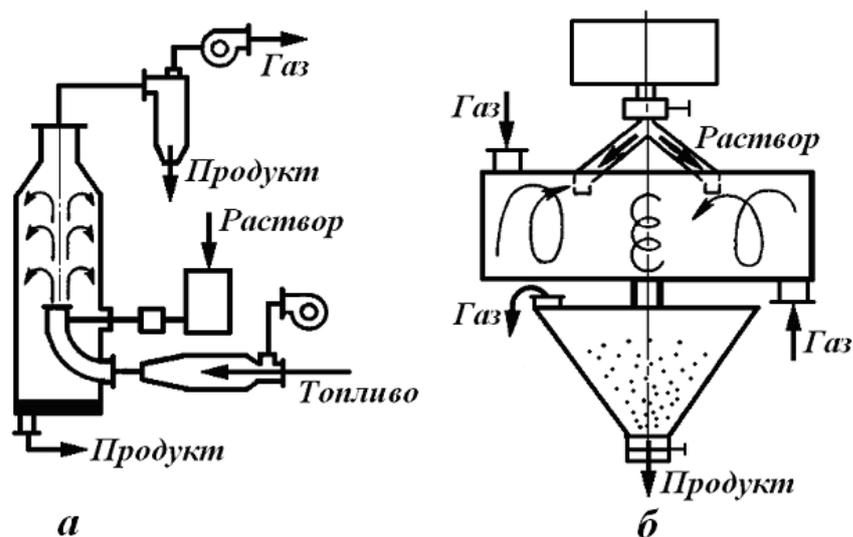


Рисунок 1.3 - Схемы камер распылительных сушилок

а – с противоточным сопловым подводом теплоносителя; б – закрученные встречные потоки, форсуночный распыл, тангенциальный подвод теплоносителя.

Выбор способа распыления и конструкции распыливающего устройства определяются свойствами распыливаемой жидкости, требуемыми характеристиками факела распыла определенной дисперсности, производительностью, степенью сложности конструкции экономическими соображениями и др.

Способы распыливания жидкостей классифицируют по способам подвода энергии, расходуемой на диспергирование [20,24,58,102,103,104,105].

Гидравлический способ распыливания экономичен и прост, но при этом распыл гидравлической форсунки грубый и неоднородный, а также затруднительно диспергирование высоковязких жидкостей.

Механический способ позволяет распылять высоковязкие жидкости и контролировать/регулировать в широком диапазоне производительность без изменения дисперсности. Главным недостатком механического распыливания является потребность в значительных энергозатратах на привод центробежного распыливающего механизма.

В основе пневматического способа распыления лежит взаимодействие потока жидкости с потоком распыливающего агента. Качество пневматического распыления не зависит от расхода жидкости, но повышен расход электроэнергии

по сравнению с гидравлическим в 15 – 20 раз и в 3 – 4 раза по сравнению с механическими способами [104].

Перспективным является пульсационное распыливание при пульсации давления и варьировании расхода, которое может комбинироваться с другими способами и при этом, увеличение энергозатрат и усложнение конструкции минимальны.

При ультразвуковом распыливании, тонкое дробление достигается либо за счет подачи струи продукта на колеблющийся элемент генератора звука, либо путем ультразвуковых колебаний потока воздуха. Для ультразвукового распыливания необходимо использование сложного оборудования.

Электрогидравлическое распыливание позволяет управлять дисперсными характеристиками факелов распылов в широких диапазонах, но данный способ не получил широкого распространения, так как для его реализации требуется дорогостоящее энергоемкое оборудование.

Сочетание способов распыливания позволяет получить такие характеристики факела распыла, которые нельзя обеспечить применением способов по отдельности. Например, сочетание гидравлического и пневматического способов позволяет получить распыл с дисперсными характеристиками, сопоставимыми с пневматическим распыливанием, но при меньших затратах энергии [104].

Механизм дробления жидкости зависит, прежде всего, от формы вытекающей струи и соотношения скоростей окружающего газа и струи, которые в свою очередь определяются методом распыливания и конструкцией распылителя [20,24,58,102,103,104,105].

Детальный обзор различных перспективных конструкций и методик расчета струйных распылителей, струйных форсунок с соударением струй и ударно-струйных форсунок приведен в работах [102,103,104,105].

Центробежные форсунки следует классифицировать по способу получения закрученного потока жидкости и по конструктивным особенностям [142]. Конструкции широко применяемых в промышленности форсунок приведены в работах [14,65, 66,104,142].

Конструкции центробежно-струйных форсунок можно разделить на три группы: с тангенциальным вводом потока в камеру закручивания, с завихряющими вкладышами или шнеками; форсунки со специальными конструктивными элементами. [102,103,104,105].

В работах [31,32,104,143,144,145,146] приведены новые конструктивные схемы центробежных форсунок.

Анализ рабочих элементов механических распылителей приведен в работе [104]. В форсунках с вращающимся распылителем [27,36,60,94,147] пленка жидкости создается вращением диска или барабана, во внутреннюю полость которого подается жидкость.

Обзоры конструкций ультразвуковых и газовых форсунок приведены в [103,104,105]. В газовых форсунках [21,23,24,100,101] струя или пленка жидкости подводится под некоторым углом к направлению газового потока.

При использовании электрогидравлических форсунок [34,35] добавочная энергия прикладывается к потоку жидкости в результате высоковольтного электрического заряда в полости распылителя (пробой жидкости).

Наложение пульсаций позволяет улучшать характеристики известных способов распыливания. Выделяют пульсационно-механические [28,61], пульсационно-гидравлические [32,62,63,82], пульсационно-пневматические [29,30] форсунки.

Специфические особенности сушки распылением обуславливают ряд достоинств этого способа:

- Высокое качество продукта при исключении его перегрева в процессе обезвоживания.
- Высушенный продукт обладает высокой растворимостью и не требует дополнительного измельчения.
- Возможность высушивать продукты с высокой исходной влажностью и т.д.

Однако следует отметить ряд недостатков:

- Значительные удельные габариты установок, так как диаметр зависит от характеристик распыла и расходов потоков продукта и сушильного агента, а высота сушилки напрямую зависит от времени сушки.

- Сложность, энергоемкость и высокая стоимость оборудования для распыливания исходного продукта и улавливания частиц высохшего продукта.
- Сравнительно высокие энергетические затраты.
- Ограниченное время нахождения продукта в сушильной камере и т.д.

Ниже представлен обзор по некоторым перспективным конструкциям разработанных для уменьшения и/или устранения выявленных недостатков присущих распылительной сушке.

Перспективной является установка для распылительной сушки [109], обеспечивающая быстрое удаление поверхностной влаги, предотвращение слипания гранул и получение частиц заданного размера (рисунок 1.4).

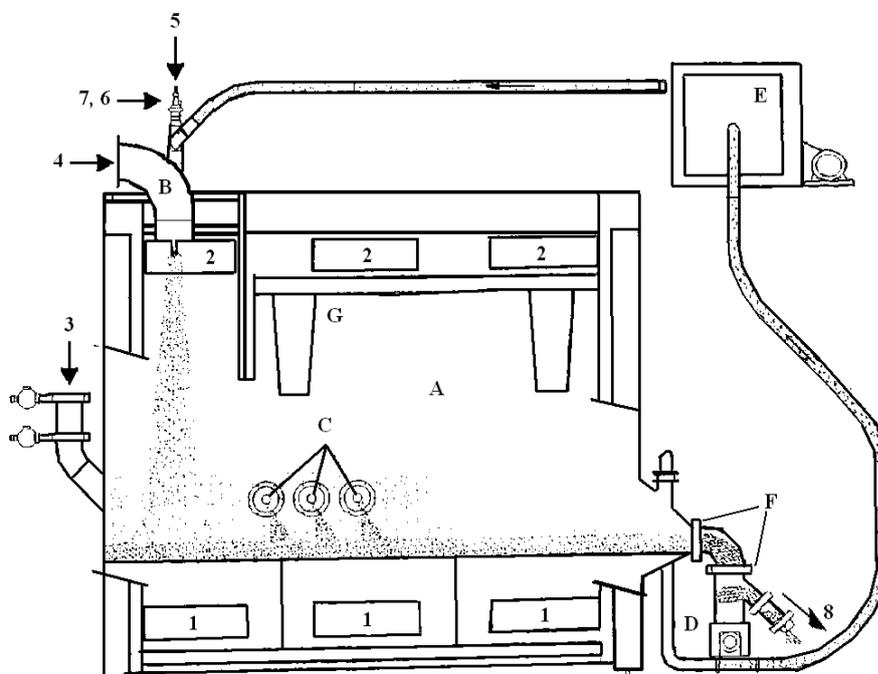


Рисунок 1.4 - Обобщенная технологическая схема установки для распылительной сушки:

1 - камеры введения воздуха, 2 - камеры удаления воздуха, 3 - порт загрузки, 4 - подача горячего воздуха, 5 - подача жидкости, 6 - распыляемый воздух, 7 - нагревающий агент, 8 - продукт, 9 - порошок, А - установка псевдооживленного слоя, В - модуль распылительной сушки, С - грануляционные сопла, D - дозирующее устройство для порошка, E - вентилятор для возврата порошка, F - лопастной клапан, G - динамический фильтр.

Установка (рисунок 1.4) содержит распылительную колонну, псевдооживленный слой, модуль распылительной сушки, одно или несколько дополнительных распылительных или пульверизационных сопел для жидкого

компонента, расположенных в псевдооживленном слое, дозирующее устройство для порошка, возвратник порошка с вентилятором и интегрированный в ней динамический фильтр для освобождения газа от части порошка. Двухкомпонентное распылительное сопло снабжено коаксиально расположенным возвратом порошка и окружающим потоком горячего воздуха. В предлагаемом способе производства порошкообразного материала [109] на первой стадии объединяются жидкий компонент, распылительный газ, порошкообразный материал и горячий воздух. Образующийся порошкообразный продукт падает на псевдооживленный слой, подхватывается, оживляется и транспортируется далее. На одной или более стадиях грануляции он распыляется с дополнительным жидким компонентом, сушится и переносится с псевдооживленным слоем к дозирующей установке для порошка, из которой часть порошкообразного материала возвращается в процесс.

Представляет интерес распылительная сушилка с инертной насадкой [111], позволяющая повысить производительность сушки (рисунок 1.5). Это достигается тем, что распылительная сушилка с инертной насадкой (рисунок 1.5) содержит камеру с газораспределительной решеткой для размещения инертных тел, приводимых в псевдооживленное состояние, и отбойник многоступенчатой конструкции для очистки инертных тел от материала, выполненный в виде системы струн, расположенных по всему сечению камеры и укрепленных на ее внутренних стенках. Струны отбойника (рисунок 1.5) расположены в горизонтальных плоскостях по всему сечению конической расширяющейся части корпуса и укреплены на ее внутренних стенках с помощью ободов. Струны могут быть закреплены между штырями с образованием геометрически правильных фигур или лучеобразно таким образом, чтобы обеспечивалась равномерная перфорация и линейность сопротивления отбойника.

Наряду с предыдущей достойна внимания распылительная сушилка типа ВЗП (со встречными закрученными потоками) с инертным носителем [114], также позволяющая повысить производительность сушки (рисунок 1.6).

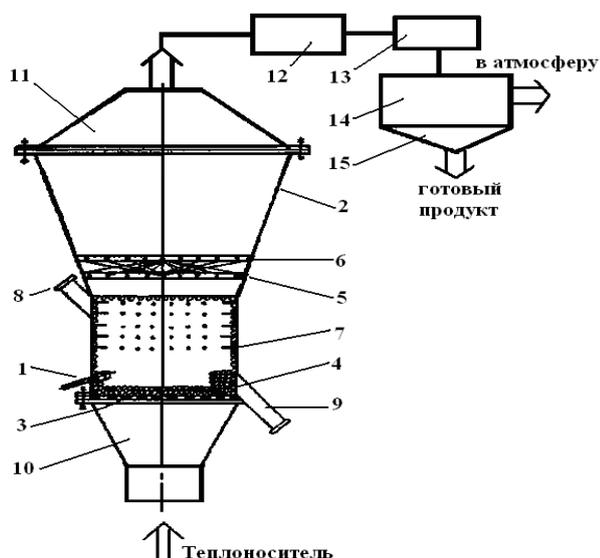


Рисунок 1.5 - Распылительная сушилка с инертной насадкой

1 – акустическая пневматическая форсунка, 2- камеры, 3- газораспределительная решетка, 4- инертные тела, 5 и 6- ободы, 7- отбойник, 8 и 9- патрубки, 10- короб, 11- крышка, 12- акустическая установка, 13- циклон, 14- рукавный фильтр, 15- бункер.

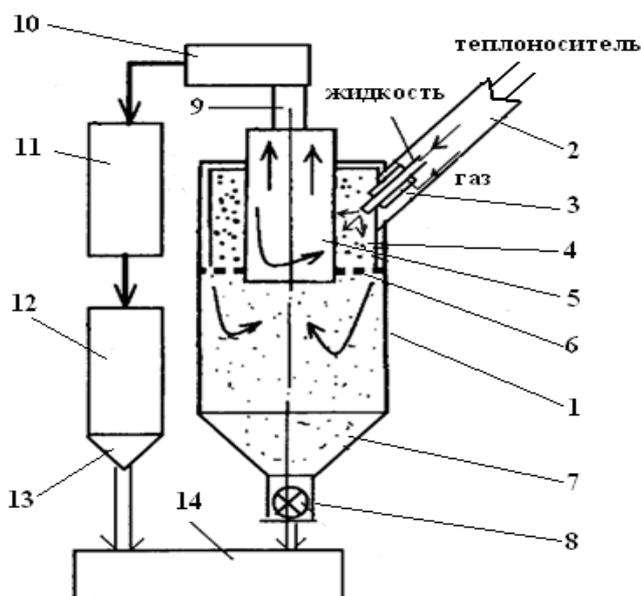


Рис. 1.6 - Распылительная сушилка типа ВЗП с инертным носителем

1 – цилиндрический корпус, 2- тангенциальные сопла, 3 – пневматические форсунки, 4 – слой инертного материала, 5 – центральный газосток, 6 – перфорированная решетка, 7 – бункер, 8 – затвор, 9 – трубопровод, 10 – акустическая установка, 11 – циклон, 12 – рукавный фильтр, 13 – бункер, 14 – транспортер

Распылительная сушилка (рисунок 1.6) содержит цилиндрический корпус с тангенциальными соплами для подачи теплоносителя, в которых размещены

пневматические форсунки для подачи продукта в слой инертного материала и центральный газоход, предназначенный для отвода отработанного теплоносителя.

Высушиваемый продукт напыляется форсунками на частицы инертного материала, высушивается на них, отделяется от их поверхности и выносится потоком отработанного теплоносителя через газоход, при этом часть частиц высушиваемого продукта поступает в бункер, а другая часть частиц из газохода по трубопроводу поступает в акустическую установку для звуковой обработки среднedisперсной пыли, после чего поток направляется в циклон, рукавный фильтр с бункером, из которого готовый продукт поступает на транспортер.

Повысить интенсивность процесса сушки способна установка для вихревой распылительной сушки [113]. Установка (рисунок 1.7) содержит, по крайней мере, пару вихревых камер, сопряженных между собой с образованием в месте сопряжения переточного окна.

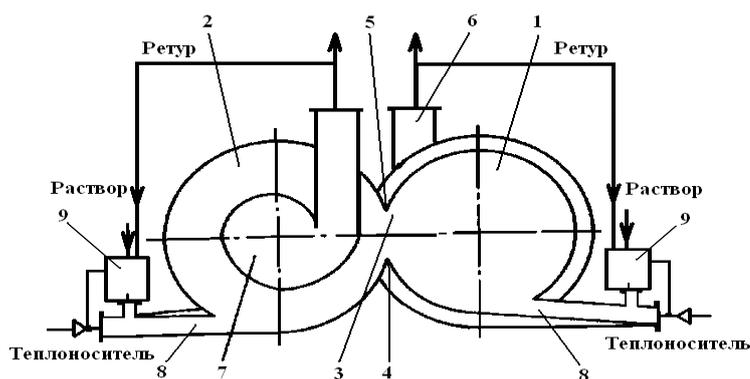


Рисунок 1.7 - Установка для вихревой распылительной сушки

1, 2- вихревые камеры, 3 -сопряжение окна, 4,5- гребни, 6,7- улитки, 8- патрубков, 9- устройство подачи исходного раствора

К камерам подключены тангенциальные патрубки для ввода теплоносителя и улитки для вывода газовой взвеси. Стенки камер выполнены в виде усеченных конусов, обращенных меньшими основаниями в противоположные стороны. Улитки подключены к большим основаниям конусов. Узел соединения пневматической форсунки с резонатором системы пневмоподдачи дисперсного материала, связанного с дозатором, состоит из корпуса пневматической форсунки и гильзы, соединенной с корпусом форсунки посредством крепежного элемента. В гильзе имеются, по крайней мере, два конических отверстия, связанные через

трубопроводы системы пневмоподачи дисперсного материала с дозатором. Между корпусом форсунки и гильзы расположен резонатор. Пневматическая форсунка состоит из корпуса, направляющей, контргайки, наконечника и сопла.

Актуальной и высокопроизводительной является распылительная сушилка кипящего слоя с инертной насадкой [115], которая содержит (рисунок 1.8) сушильную камеру с газораспределительной решеткой, вибрирующие пластины вибрационного механизма, установленные в корпусе сушилки с возможностью поворота относительно осей, и форсунку. На вибрирующих пластинах в шахматном порядке жестко закреплены дополнительные пластины разной длины под углом, например $80...40^\circ$, к вибрирующим пластинам, причем свободные вершины дополнительных пластин у правой вибрирующей пластины обращены вверх, а у левой – вниз.

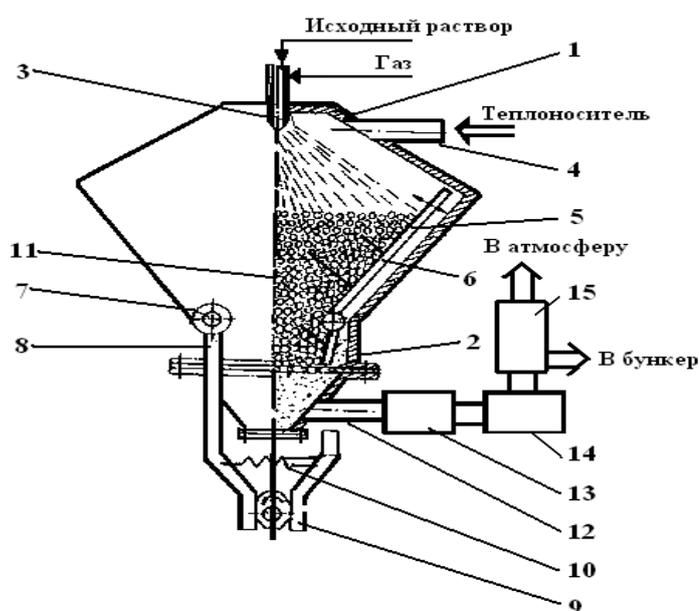


Рисунок 1.8 - Распылительная сушилка кипящего слоя с инертной насадкой

1- сушильная камера, 2- газораспределительная решетка, 3- акустическая форсунка, 4- патрубок ввода теплоносителя, 5- инертная насадка, 6- вибрирующие пластины, 7- вал, 8- штанги, 9- кулачок, 10- пружина, 11- дополнительные пластины, 12- патрубок вывода теплоносителя, 13- акустическая установка, 14- циклон, 15- рукавный фильтр

Для повышения экономичности и качества сушки путем предотвращения налипания материала на стенки камеры рационально использовать вихревую распылительную сушилку (рисунок 1.9) для дисперсных материалов [112].

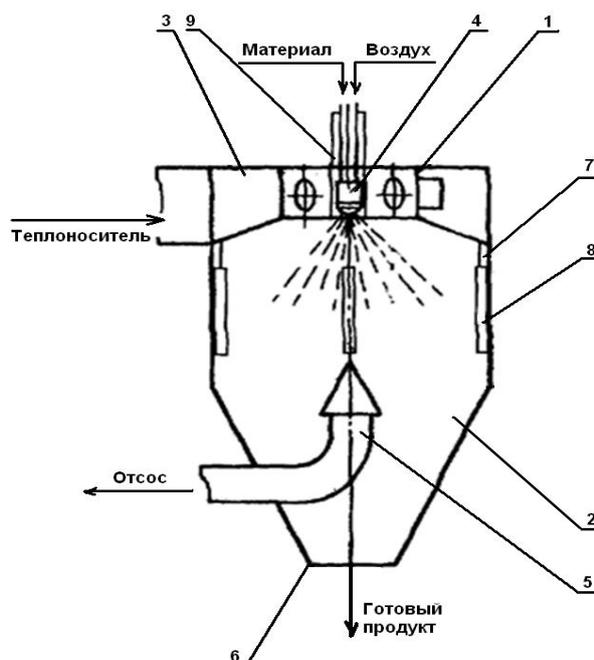


Рисунок 1.9 - Вихревая распылительная сушилка для дисперсных материалов.

1 - цилиндр, 2 – сушильная камера, 3, 5, 6 – патрубки, 4 – распылитель, 7 – щелевые сопла, 8 – лопатки, 9 – корпус распылителя.

Для повышения производительности сушки целесообразно использовать установку (рисунок 1.10) для сушки растворов, суспензий и пастообразных материалов [110].

Практический интерес представляет камера сушки распылительной сушилки, позволяющая повысить производительность и снизить потери высушенного материала. Камера (рисунок 1.11) распылительной сушилки выполнена в виде вертикально установленной цилиндрической емкости с форсункой и с патрубками входа и выхода сушильного агента и выгрузки высушенного материала, в которой к концу патрубка выхода сушильного агента, расположенному в цилиндрической емкости, присоединена труба, в свободный конец которой вставлена спиральная лента. На противоположном конце трубы выполнены продольные прорезы, причем спиральная лента установлена в трубе с возможностью вращения, передняя кромка продольных прорезей по ходу вращения спиральной ленты отогнута наружу, а задняя кромка – внутрь трубы.

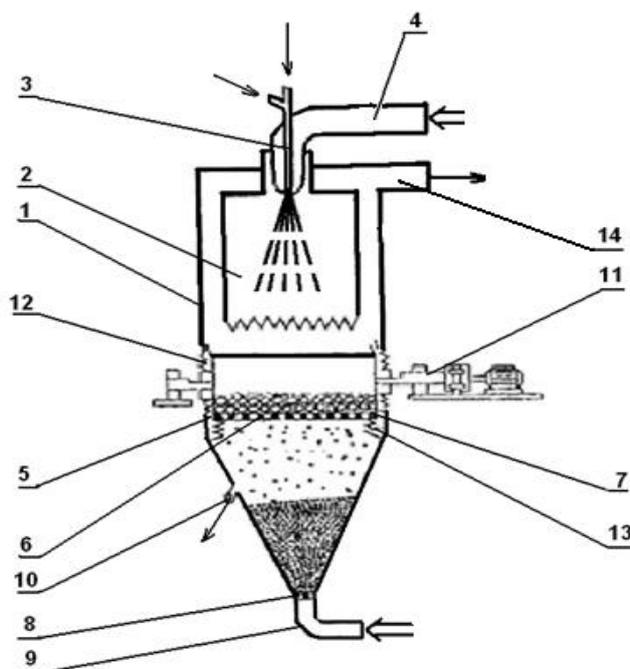


Рисунок 1.10 - Установка для сушки растворов, суспензий и пастообразных материалов.
 1 – корпус, 2 – камера, 3 – форсунка, 4 – верхний газораспределитель, 5 - гранулятор, 6 – сетчатое днище, 7 – вибрирующий лоток, 8 – газораспределительные решетки, 9 – нижний газораспределитель, 10 – течка для выхода гранул, 11 – привод, 12, 13 - пружины, 14 – выходной патрубок.

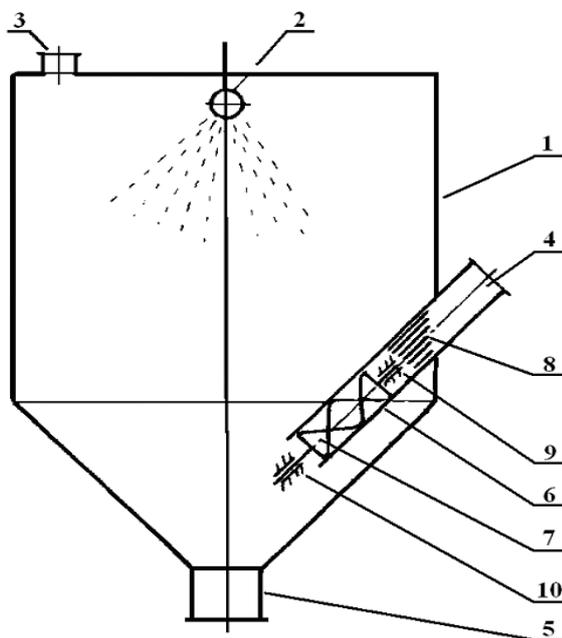


Рисунок 1.11 - Камера сушки распылительной сушилки
 1 – цилиндрическая емкость, 2 – форсункой, 3 – патрубок входа, 4 – патрубок выхода сушильного агента, 5 – патрубок выгрузки высушенного материала, 6 – труба, 7 – спиральная лента, 8 – продольные прорези, 9 и 10 – подшипники

На кафедре «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет» предложен ряд конструкторских решений для организации распылительной сушки [107,116,117,118].

Широкое внедрение в производственную практику сушильной техники сдерживается отсутствием режимных карт и корректных, экспериментально обоснованных программ перенастройки на различные виды сырья и адекватных системы автоматического регулирования. Очевидна необходимость разработки таких режимов, как для конкретных видов продукции, так и их обобщение для использования в инженерных расчетах при проектировании сушильной техники.

Разработка и обоснование принципиально новых инновационных схем организации процесса и конструкторских решений необходимы для минимизации/устранения недостатков присущих традиционным конструкциям, а также для расширения перспектив использования распылительной сушильной техники в условиях предприятий малой и средней мощности. Очевидна необходимость учета при проектировании сушильной техники комплекса свойств объектов сушки, в том числе термодинамических, структурно-механических и теплофизических. Не вызывает сомнений необходимость разработки математических моделей адекватных происходящим явлениям, для оперативного управления процессом, и качеством продукции, автоматизации работы сушилок.

Анализ конструкторских решений в области организации распылительной сушки показал, что дальнейшее развитие получают: использование встроенных поверхностей нагрева, перемешивающих и вибрационных устройств; использование импульсного подвода тепла; создание замкнутых циклов с целью снижения энергозатрат и решения экологических проблем; разработка специальной сушильной технологии с использованием полей различной физической природы и специальных добавок; создание комбинированных сушилок; совмещение процесса сушки с другими процессами.

Для определения рационального режима сушки, выбора способа и конструкции установки необходимо исследовать изменения химико-технологических показателей с учетом реальной динамики обезвоживания.

ГЛАВА 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯИЧНЫХ ПРОДУКТОВ С ВОДОЙ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ, ГИГРОСКОПИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Представлены результаты комплексных исследований статики процесса сушки и свойств яичных продуктов как объектов обезвоживания.

2.1 Теплофизические и структурно–механические характеристики яичных продуктов

Теплофизические характеристики (ТФХ) материала в значительной степени определяют скорость и характер протекания тепло- и массообменных процессов. ТФХ зависят от структуры и физико-химических параметров продуктов. Известно [86], что теплопроводящие свойства влажных пищевых материалов характеризуются коэффициентом теплопроводности λ , а теплоинерционные характеристики – коэффициентом температуропроводности a .

Очевидно, что количественное изменение содержания влаги в пищевом материале вызывает изменение ТФХ и ряда других физико-химических характеристик.

При использовании экспериментальных значений ТФХ в инженерной практике для проектирования технологических процессов и оборудования вероятны значительные погрешности, т.к. лабораторные условия проведения опытов отличаются от реальных производственных режимов. В частности, каждый лабораторный метод определения ТФХ не моделирует непрерывный процесс тепломассообмена, при котором параллельно протекают биологические и физико-химические процессы, обуславливающие изменение ТФХ.

Данные литературных источников по характеристикам яичных продуктов [42 и др.] разноречивы, представлены для узких диапазонов влажностей и температур и преимущественно в табулированном виде, что затрудняет оперативное использование значений ТФХ в инженерных/проектных расчетах и физико-математических моделях процессов.

Изучение, систематизация и обобщение ТФХ яичных продуктов необходимы для дальнейшего научного анализа кинетики и динамики тепломассообменных процессов, их математического моделирования и решения задач оптимизации.

Получены зависимости плотности ρ , удельной теплоемкости c , коэффициента температуропроводности a и коэффициента теплопроводности λ от температуры и влажности яичных продуктов.

Сушке подвергают все виды яичных продуктов: белок, желток и меланж. Технологические свойства сухих яичных продуктов определяются режимом сушки. При обезвоживании, для исключения денатурация белков, температура яичной массы не должна превышать 55 – 65°C [18,19,75,93,139,141].

Таким образом, для установления зависимостей ТФХ от температуры примем верхний предел варьирования температуры продукта $T = 333\text{K}$. Нижний предел $T = 278\text{K}$, соответствует температуре хранения жидких яичных продуктов и принят на основании результатов анализа технологии сухих яичных продуктов [18,19,75,93,139,141].

Таблица 2.1 - Диапазоны изменения влажности и температуры яичных продуктов

№ п/п	Продукт	W , кг/кг	T , К
1	Белок	0,882÷0,09	278÷333
2	Желток	0,54÷0,05	278÷333
3	Меланж	0,75÷0,085	278÷333

Диапазон варьирования влажности W соответствует реальному изменению W в процессе обезвоживания (таблица 2.1) и принимается на основании требований к физико-химическим показателям продуктов, регламентированных в ГОСТ Р 53155-2008 «Продукты яичные жидкие и сухие пищевые. Технические условия».

2.1.1 Исследование плотности яичных продуктов

В литературе [42 и др.] имеются некоторые данные о плотности яичных продуктов, однако сведения источников весьма разноречивы. Ввиду простоты

организации и проведения экспериментальных исследований, выполнены эксперименты по определению плотности белка, желтка и меланжа в требуемых диапазонах варьирования влияющих факторов (таблица 3.1). Определение плотности яичных продуктов осуществлялось пикнометрическим методом, который заключается в измерении массы исследуемого продукта известного объема. Экспериментальная установка, включает (рисунок 2.1): перемешивающее устройство 1; мерный стакан 2 (допускаемая основная погрешность прибора не более 0,1%); хромель-копелевую термопару 3 ХК(L) ТП-011 (номинальные статические характеристики прибора по ГОСТ Р 8.585-2001, допускаемая основная погрешность – не более 0,5 К), подключаемую к мультиметру 5; аналитические весы 6 Adventurer OHAUS AR3130 соответствующие 2-му классу точности по ГОСТ 24104-88 (допускаемая основная погрешность прибора не более 0,1%).

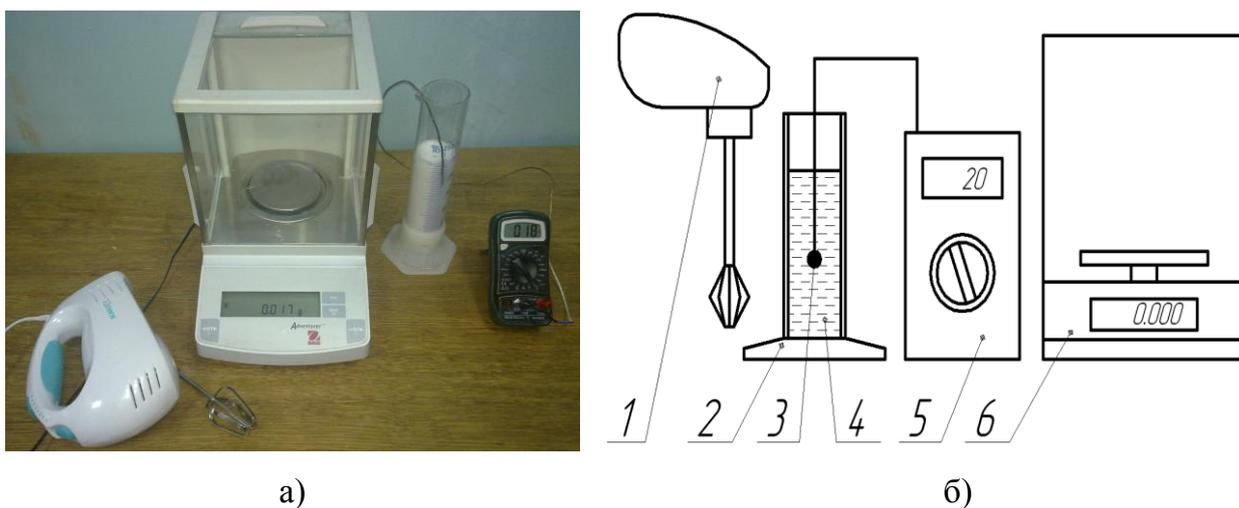


Рисунок 2.1- Общий вид (а) и схема экспериментальной установки определения плотности (б): 1 – перемешивающее устройство; 2 – мерный стакан; 3 – термопара; 4 – исследуемый продукт; 5 – мультиметр; 6 – аналитические весы

Основными параметрами, влияющими на плотность ρ , кг/м³ являются – влажность W , кг/кг и температура T , К продукта. Объем исходного V , м³ продукта измерялся мерным стаканом 1, температура продукта T , К фиксировалась термопарой 2, подсоединяемой к мультиметру 3, масса m , кг регистрировалась аналитическими весами 2 (рисунок 2.1). Плотность определялись по отношению:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1).$$

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблицах 2.2 – 2.7. Каждый опыт для повышения точности измерений проводился при 3-х повторностях. Вычисление погрешностей при определении плотности продукта выполнялось в традиционной последовательности [55,97]:

- Составление таблицы измерений; определение среднего значения измеряемой плотности:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_1^n \rho_i \quad (2.2),$$

где $n = 3$ – число измерений в выборке, ρ_i – численное значение измеренной плотности, $i = 1, 2 \dots n$.

- Определение единичных отклонений $\Delta\rho_i = \rho_i - \bar{\rho}$, проверка согласия с соотношением $\sum_1^n \Delta\rho_i = 0$.

Вычисление квадратов отклонений $(\Delta\rho_i)^2$; определение средних квадратичных отклонений:

$$S_n = \sqrt{\sum_1^n (\Delta\rho_i)^2 / (n-1)} \quad (2.3).$$

- Выявление и исключение промахов из таблицы измерений (промахи измерения – при которых $\Delta\rho_i > 2S_n$); определение средних квадратичных отклонений среднего:

$$S_{\bar{\rho}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\sum_1^n (\Delta\rho_i)^2 / [n(n-1)]} \quad (2.4).$$

- определение критерия Стьюдента $t_{an} = 4,3$; вычисление погрешности результатов измерений:

$$\Delta\rho = \varepsilon_{\alpha} = t_{an} S_{\bar{\rho}} \quad (2.5).$$

- определение относительных погрешностей

$$\varepsilon_{\rho} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot 100\% \quad (2.6).$$

Таблица 2.2 - Результаты экспериментального определения плотности белка
и их статистической обработки

W , кг/кг	T , К	ρ_1 , кг/м ³	ρ_2 , кг/м ³	ρ_3 , кг/м ³	ρ , кг/м ³	S_n , кг/м ³	S_ρ , кг/м ³	$\Delta\rho$, кг/м ³	ε_ρ , %
0,882	278	1053,4	1044,1	1047,7	1048,4	4,689	2,707	11,642	1,110
	313	1033,5	1035,3	1043,5	1037,4	5,330	3,078	13,233	1,276
	333	1030,1	1031,2	1034,4	1031,9	2,234	1,290	5,546	0,537
0,6	278	1141,3	1142,5	1131,5	1138,4	6,034	3,484	14,981	1,316
	313	1120,4	1135,1	1123,7	1126,4	7,713	4,453	19,148	1,700
	333	1134,5	1112,9	1110,4	1119,3	13,252	7,651	32,898	2,939
0,4	278	1198,7	1222,4	1252,9	1224,7	27,171	15,687	67,455	5,508
	313	1190,2	1194,6	1211,6	1198,8	11,301	6,525	28,057	2,340
	333	1171,4	1199,7	1178,4	1183,2	14,740	8,510	36,593	3,093
0,09	278	1337,9	1305,7	1300,4	1314,7	20,294	11,717	50,383	3,832
	313	1304,1	1291,4	1297,1	1297,5	6,361	3,673	15,792	1,217
	333	1280,1	1280,8	1298,4	1286,4	10,369	5,987	25,743	2,001

Таблица 2.3 - Результаты экспериментального определения плотности желтка
и их статистической обработки

W , кг/кг	T , К	ρ_1 , кг/м ³	ρ_2 , кг/м ³	ρ_3 , кг/м ³	ρ , кг/м ³	S_n , кг/м ³	S_ρ , кг/м ³	$\Delta\rho$, кг/м ³	ε_ρ , %
0,54	278	1020,8	1031,2	1031,5	1027,8	6,093	3,518	15,126	1,472
	313	1015,4	1014,4	1025,4	1018,4	6,083	3,512	15,101	1,483
	333	1012,4	1020,8	1005,4	1012,9	7,711	4,452	19,142	1,890
0,45	278	1145,6	1142,5	1124,1	1037,4	11,622	6,710	28,853	2,781
	313	1023,2	1035,1	1023,7	1027,3	6,731	3,886	16,710	1,627
	333	1034,5	1012,9	1013,4	1020,3	12,329	7,118	30,608	3,000
0,35	278	1051,7	1023,4	1052,9	1042,7	16,696	9,640	41,450	3,975
	313	1040,2	1046,6	1011,6	1032,8	18,637	10,760	46,267	4,480
	333	1021,4	1034,7	1028,4	1028,2	6,653	3,841	16,517	1,606
0,05	278	1036,8	1063,9	1071,4	1057,4	18,202	10,509	45,188	4,273
	313	1050,1	1064,1	1040,4	1051,5	11,915	6,879	29,580	2,813
	333	1041	1052,4	1040,7	1044,7	6,670	3,851	16,559	1,585

Таблица 2.4 - Результаты экспериментального определения плотности меланжа
и их статистической обработки

W , кг/кг	T , К	ρ_1 , кг/м ³	ρ_2 , кг/м ³	ρ_3 , кг/м ³	ρ , кг/м ³	S_n , кг/м ³	S_ρ , кг/м ³	$\Delta\rho$, кг/м ³	ε_ρ , %
0,75	278	1040,1	1033,2	1051,5	1041,6	9,242	5,336	22,944	2,203
	313	1035,4	1033,4	1024,4	1031,1	5,859	3,383	14,547	1,411
	333	1012,6	1028,8	1035,4	1025,6	11,732	6,773	29,126	2,840
0,6	278	1060,6	1132,5	1122,1	1105,1	38,859	22,435	96,471	8,730
	313	1103,2	1105,1	1069,7	1092,7	19,912	11,496	49,435	4,524
	333	1084,5	1082,9	1095,4	1087,6	6,802	3,927	16,887	1,553
0,4	278	1158,4	1153,4	1172,9	1161,6	10,128	5,848	25,145	2,165
	313	1139,5	1146,1	1141,1	1142,2	3,443	1,988	8,547	0,748
	333	1121,1	1134,7	1140,4	1132	9,916	5,725	24,617	2,175
0,085	278	1236,2	1175,9	1271,4	1227,8	48,297	27,884	119,9	9,766
	313	1235,1	1203,1	1210,7	1216,3	16,719	9,653	41,506	3,413
	333	1205,3	1194,8	1216,7	1205,6	10,953	6,324	27,192	2,255

Таблица 2.5 - Результаты экспериментального определения плотности белка ρ_b , в кг/м³

№ п/п	T , К	W , кг/кг			
		0,882	0,6	0,4	0,09
1	278	1048,4	1138,4	1224,7	1314,7
3	313	1037,4	1126,4	1198,8	1297,5
4	333	1031,9	1119,3	1183,2	1286,4

Таблица 2.6 - Результаты экспериментального определения плотности желтка $\rho_{жс}$, в кг/м³

№ п/п	T , К	W , кг/кг			
		0,54	0,45	0,35	0,05
1	278	1027,8	1037,4	1042,7	1057,4
3	313	1018,4	1027,3	1032,8	1051,5
4	333	1012,9	1020,3	1028,20	1044,7

Таблица 2.7 - Результаты экспериментального определения плотности меланжа ρ_m , в кг/м³

№ п/п	T, К	W, кг/кг			
		0,75	0,6	0,4	0,085
1	278	1041,6	1105,1	1161,6	1227,8
3	313	1031,1	1092,7	1142,2	1216,3
4	333	1025,6	1087,6	1132,1	1205,6

Относительная погрешность при определении плотности яичных продуктов ρ не превышала $\varepsilon_\rho = 9,766\%$.

Для математического описания экспериментальные данные (таблицы 2.5 - 2.7) аппроксимированы методом точного попадания в узловые точки и получены функциональные зависимости $\rho = f(W, T)$, при этом величина достоверности аппроксимации составляла $R^2=0,99$.

Функциональная зависимость плотности белка:

$$\begin{aligned} \rho_b = & (-0,00079498 \cdot T^2 - 11,36771557 \cdot T + 3865,49211749) \cdot W^3 + \\ & (0,00312139 \cdot T^2 + 16,5239862 \cdot T - 5813,49256206) \cdot W^2 + \\ & + (0,00001526 \cdot T^2 - 7,39549681 \cdot T + 2112,55017613) \cdot W + \\ & (-0,00118192 \cdot T^2 + 0,73171306 \cdot T + 1204,88431154) \end{aligned} \quad (2.7).$$

Функциональная зависимость плотности желтка:

$$\begin{aligned} \rho_{ж} = & (-0,03123512 \cdot T^2 + 19,41190244 \cdot T - 3051,25620812) \cdot W^2 + \\ & (0,02337442 \cdot T^2 - 14,58307701 \cdot T + 2229,02805985) \cdot W + \\ & + (-0,0041356 \cdot T^2 + 2,31181453 \cdot T + 735,35569345) \end{aligned} \quad (2.8).$$

Функциональная зависимость плотности меланжа:

$$\begin{aligned} \rho_m = & (-0,02477948 \cdot T^2 + 16,45422863 \cdot T - 2877,07598118) \cdot W^2 + \\ & (0,02727754 \cdot T^2 - 17,52723521 \cdot T + 2669,50472105) \cdot W + \\ & + (-0,00593494 \cdot T^2 + 3,27538496 \cdot T + 785,05342441) \end{aligned} \quad (2.9).$$

На рисунках 2.2, 2.4 и 2.6 представлены зависимости плотности яйцепродуктов от их влажности для различных температур, полученные с использованием формул 2.7-2.9. На рисунках 2.3, 2.5 и 2.7 приведены поля значений плотности яйцепродуктов для диапазонов фактического изменения температуры и влажности продуктов в процессе сушки.

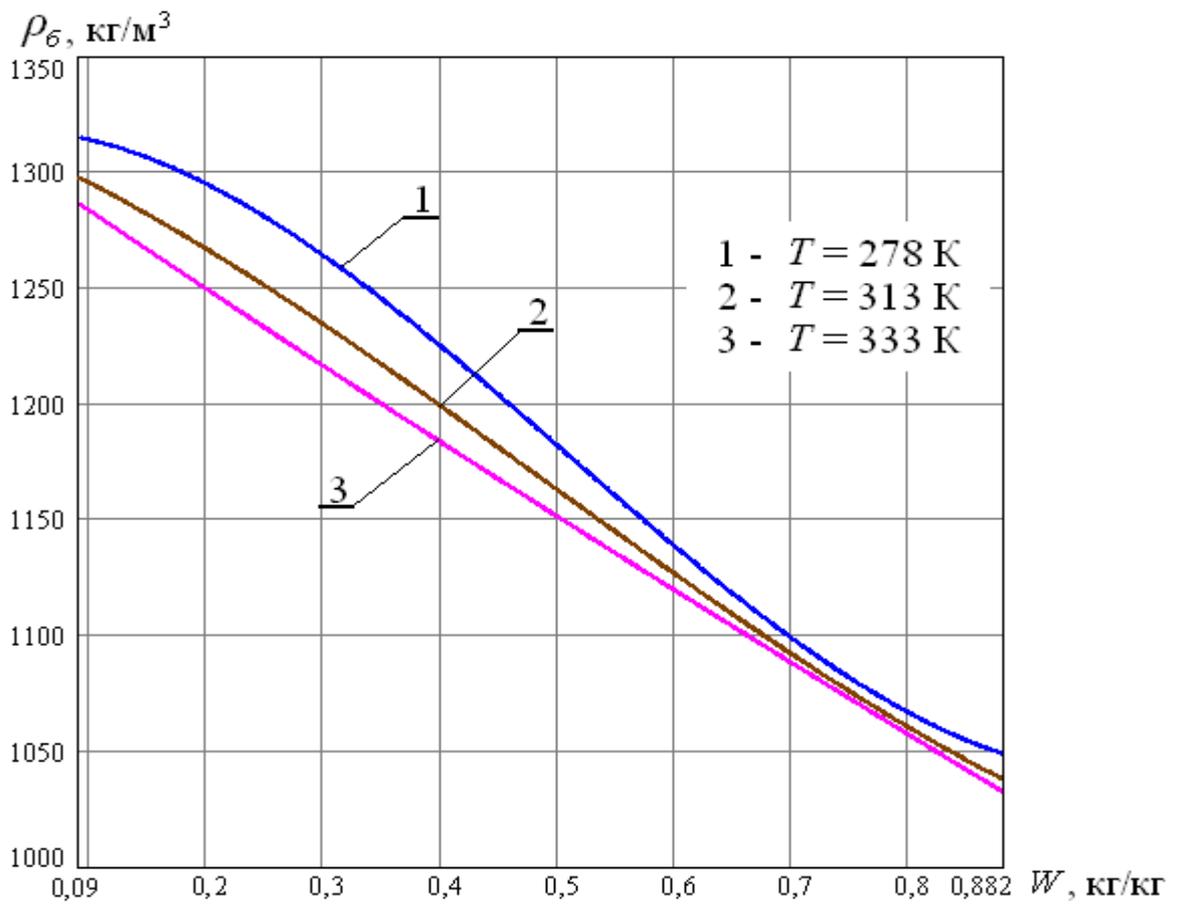


Рисунок 2.2 - Зависимость плотности белка ρ_b для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

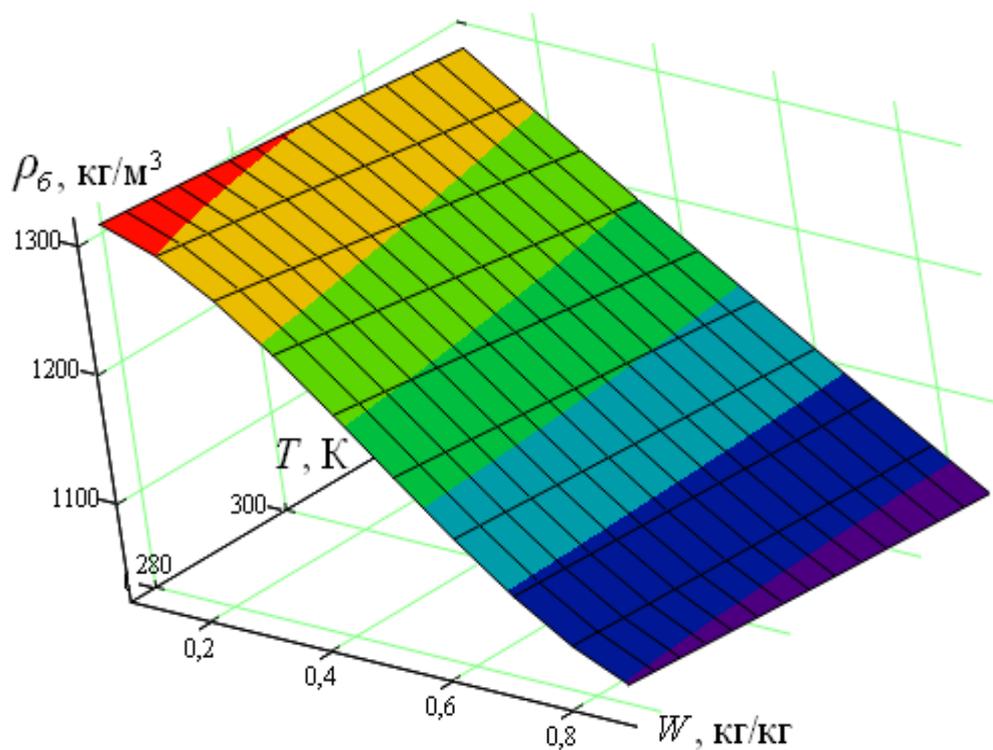


Рисунок 2.3 - Поле значений плотности белка ρ_b для $T = 278 - 333 \text{ K}$, $W = 0,09 - 0,882 \text{ кг/кг}$

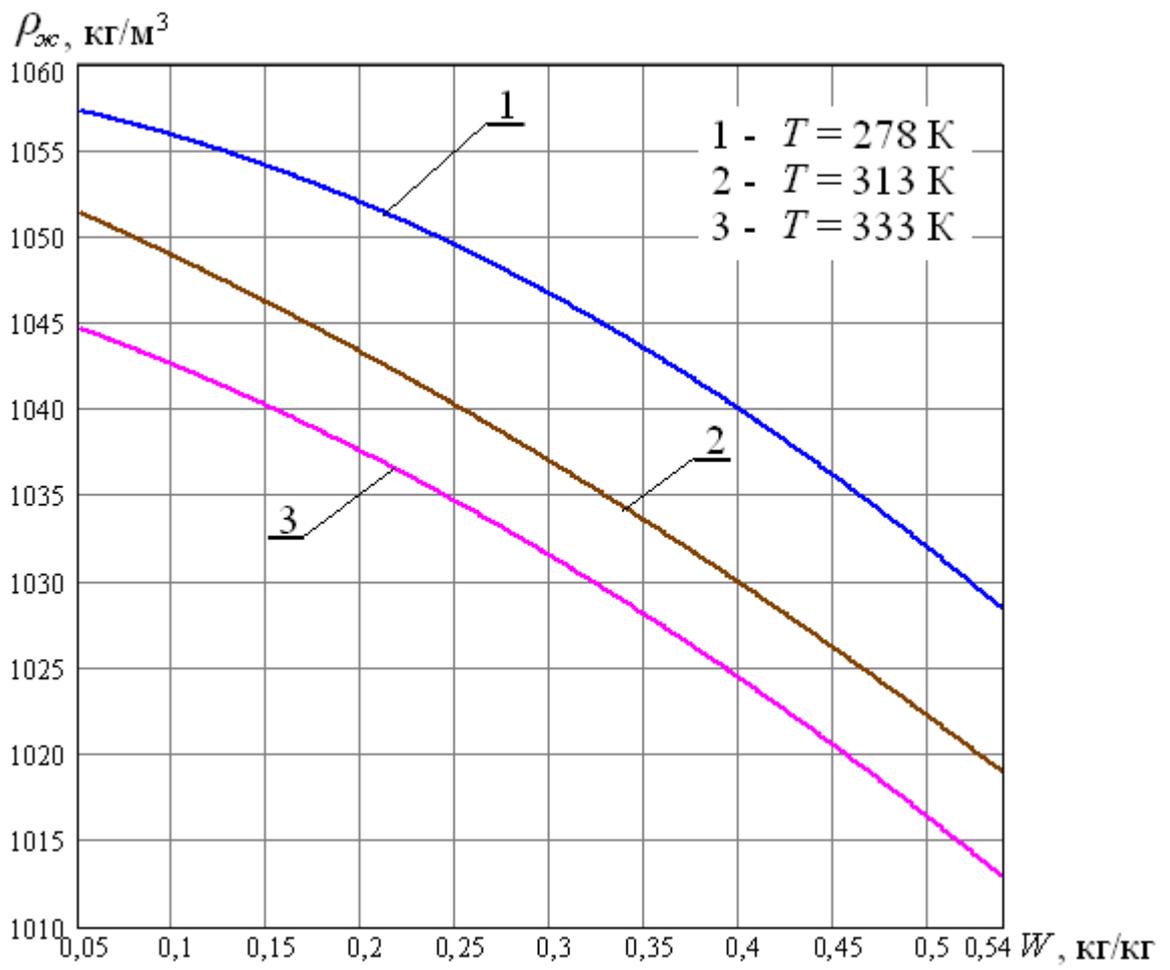


Рисунок 2.4 - Зависимость плотности желтка $\rho_{жс}$ для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

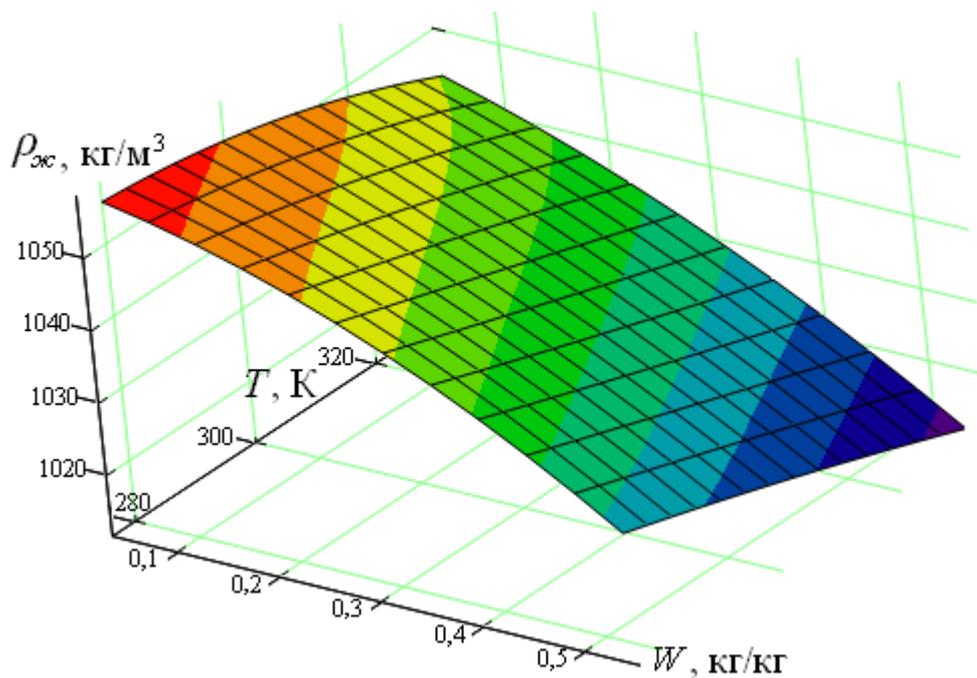


Рисунок 2.5 - Поле значений плотности желтка $\rho_{жс}$ для $T = 278 - 333 \text{ K}$,
 $W = 0,05 - 0,54 \text{ кг/кг}$

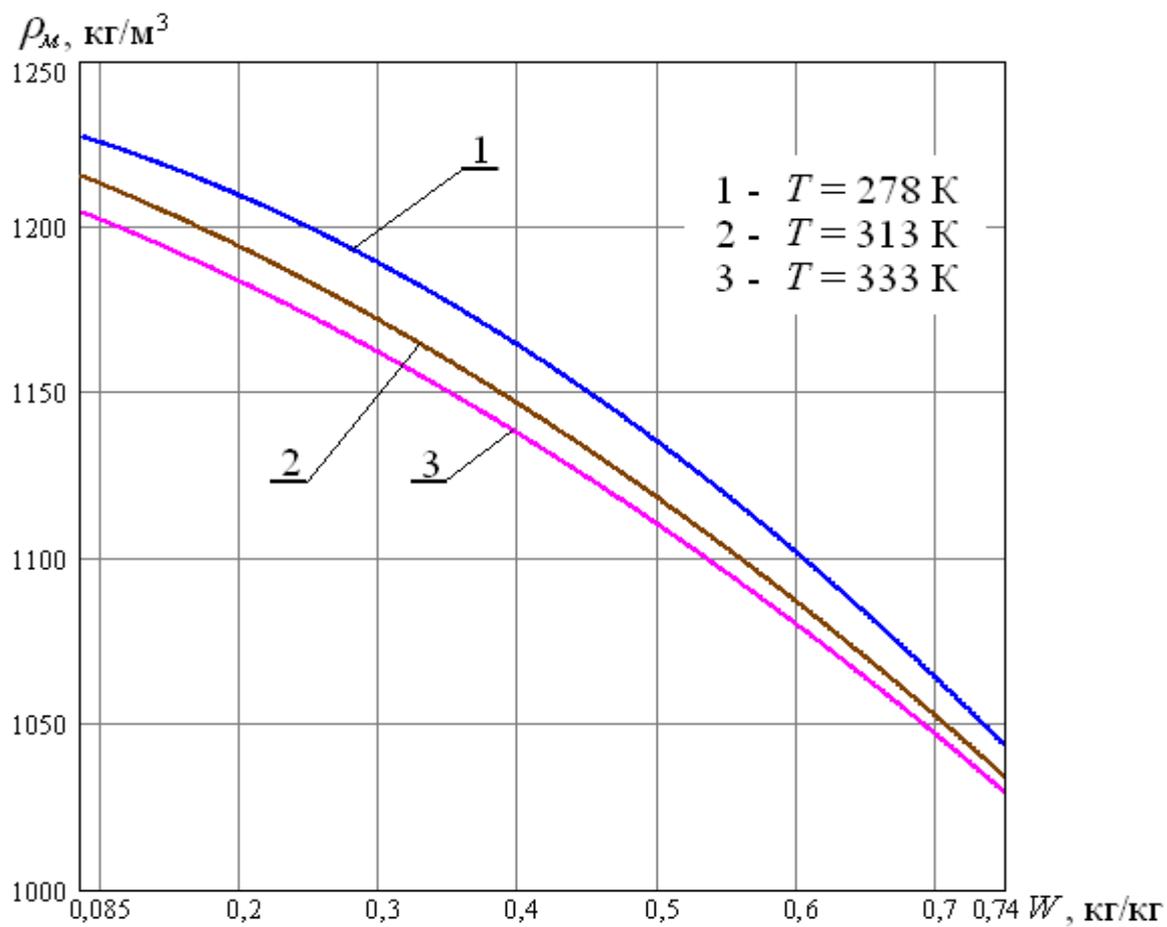


Рисунок 2.6 - Зависимость плотности меланжа ρ_m для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

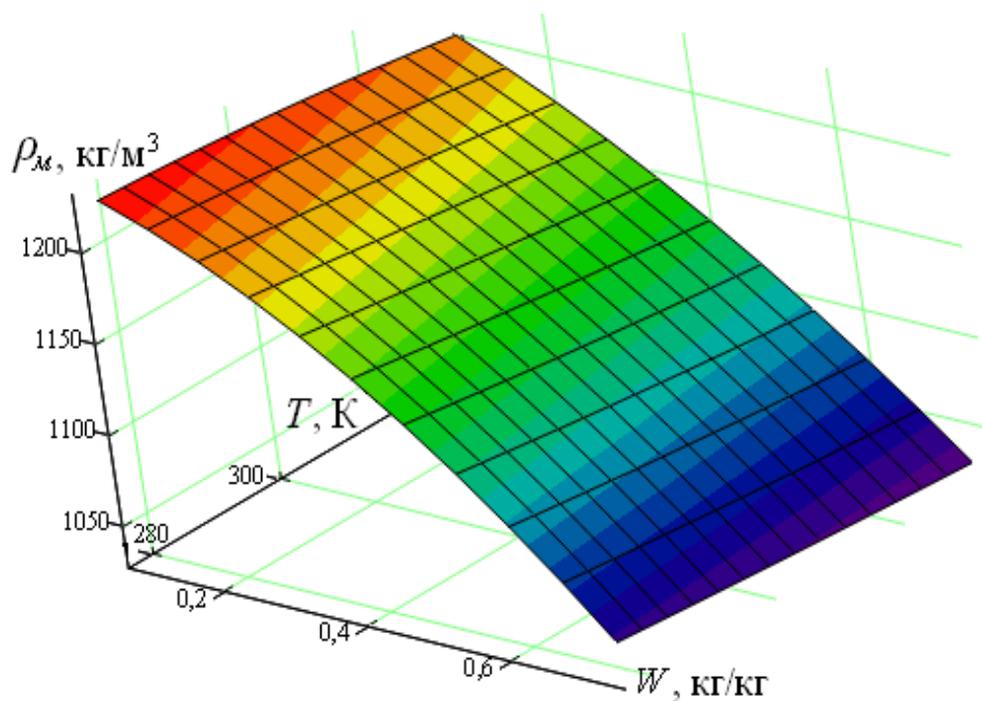


Рисунок 2.7 - Поле значений плотности меланжа ρ_m для $T = 278 - 333 \text{ K}$,
 $W = 0,085 - 0,75 \text{ кг/кг}$

Из анализа рисунков 2.2 – 2.7 следует, что существенное влияние на изменение плотности яичных продуктов оказывает изменение их влажности. При увеличении влажности для всех яичных продуктов наблюдается уменьшение их плотности (рисунок 2.2 – 2.7), что связано с увеличением доли воды, плотность которой ниже плотности сухих веществ белка, желтка и меланжа. Влияние температуры, в реальном диапазоне ее изменения (таблица 2.1), на плотность яичных продуктов незначительно.

Функциональные зависимости 2.7 – 2.9 позволяют определять с любой точностью численные значения плотности в реальных диапазонах изменения влажности и температуры продукта в процессе его обезвоживания.

Проведенный сравнительный анализ данных по плотности яичных продуктов, определенных в результате экспериментальных исследований (рисунок 2.2 – 2.7) с данными, полученными аналитически показал высокую сходимость значений для плотностей белка и желтка с относительной погрешностью в пределах 5%.

Значительные отличия в значениях плотности меланжа (относительная погрешность до 16%) объясняется, по-видимому, различным соотношением белка и желтка в исследуемых продуктах. Согласно данным [18,19,75,93,139,141] соотношение белка, желтка и скорлупы зависит от вида, возраста, породы и продуктивности, условий содержания и кормления.

В яйцах кур содержится около 6 весовых частей белка – 54-60 %, около 3 весовых частей желтка – 28-32 % и около 1 части скорлупы – 11-14 % [18,19,75,93,139,141].

Из анализа рисунков 2.2 – 2.7, построенных по экспериментальным данным, следует, что зависимость плотности от влажности яичных продуктов носит, преимущественно, нелинейный характер, то есть, в действительности, правило аддитивности не соблюдается, что объясняется:

- 1) явлениями физико-химического связывания влаги силами адсорбции в области высокой влажности яичных продуктов;
- 2) связыванием влаги в пространственных структурах (поры, замкнутые ячейки, капилляры) при формировании капиллярно-пористого коллоидного тела,

которые образуются за счет коагуляции (коалесценции) частиц (мицелл) при уменьшении влажности продукта.

Таким образом, в ходе экспериментально-аналитического изучения плотности яичных продуктов проведена систематизация и обобщение данных, получены и проанализированы функциональные зависимости плотности для диапазонов фактического изменения температуры и влажности продуктов в процессе сушки, для дальнейшего использования в инженерной практике.

Результаты необходимы для научного анализа кинетики и динамики тепломассообменных процессов, их моделирования и оптимизации с целью энерго- и ресурсосбережения при обезвоживании яичных продуктов.

2.1.2 Исследование удельной теплоемкости яичных продуктов

Зависимости удельной теплоемкости белка, желтка и меланжа от влажности W получены по правилу аддитивности, с использованием литературных данных [42 и др] при температуре $T = 293\text{K}$.

Зависимость удельной теплоемкости белка c_b , Дж/(кг·К) от текущей влажности W :

$$c_b(W) = \left(\frac{c_b^0 - c_w \cdot W_b^0}{1 - W_b^0} \right) \cdot (1 - W) + c_w \cdot W \quad (2.10),$$

где $c_b^0 = 3875$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость белка при $T = 293\text{K}$ и известной влажности $W_b^0 = 0,87$ кг/кг [42], $c_w = 4182$ Дж/(кг·К) – теплоемкость воды при $T = 293\text{K}$ [123].

После подстановки получим:

$$c_b(W) = 2361,538 \cdot W + 1820,462 \quad (2.11).$$

Зависимость удельной теплоемкости желтка $c_{жс}$, Дж/(кг·К) от текущей влажности W :

$$c_{жс}(W) = \left(\frac{c_{жс}^0 - c_w \cdot W_{жс}^0}{1 - W_{жс}^0} \right) \cdot (1 - W) + c_w \cdot W \quad (2.12),$$

где $c_{ж}^{\cdot} = 3055$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость желтка при $T = 293$ К и известной влажности $W_{ж}^{\cdot} = 0,48$ кг/кг [42].

После подстановки получим:

$$c_{ж}(W) = 2167,308 \cdot W + 2014,692 \quad (2.13).$$

Зависимость удельной теплоемкости меланжа c_m , Дж/(кг·К) от текущей влажности W :

$$c_m(W) = \left(\frac{c_m^{\cdot} - c_{г} \cdot W_m^{\cdot}}{1 - W_m^{\cdot}} \right) \cdot (1 - W) + c_{г} \cdot W \quad (2.14).$$

где $c_m^{\cdot} = 3520$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость меланжа при $T = 293$ К и известной влажности $W_m^{\cdot} = 0,725$ кг/кг [42].

После подстановки получим:

$$c_m(W) = 2407,273 \cdot W + 1774,727 \quad (2.15).$$

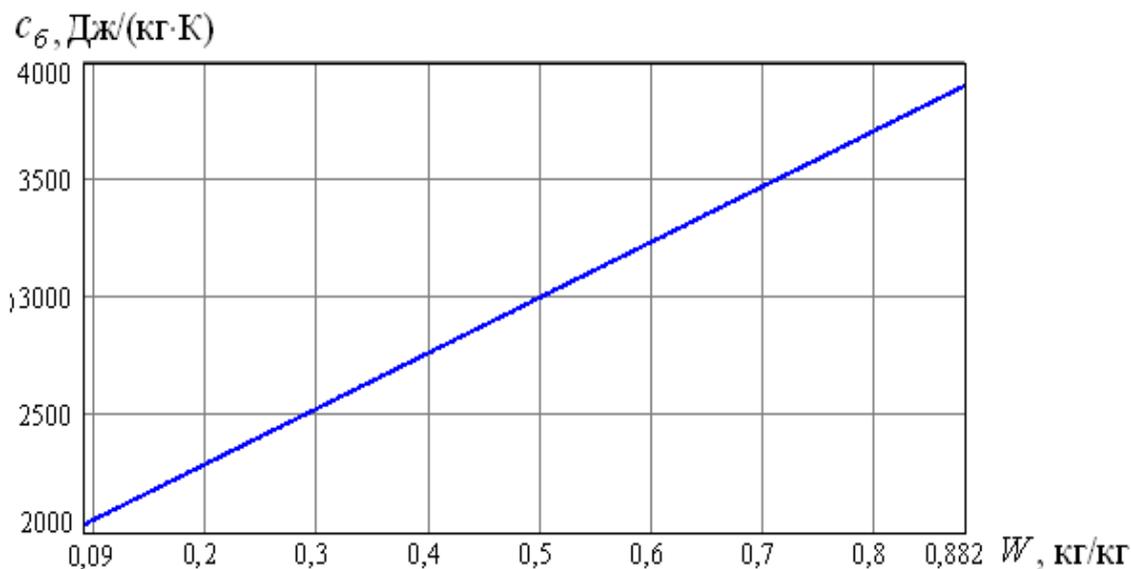


Рисунок 2.8 - Зависимость удельной теплоемкости белка c_b для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

Полученные по правилу аддитивности зависимости, в графическом виде представлены на рисунках 2.8 – 2.10.

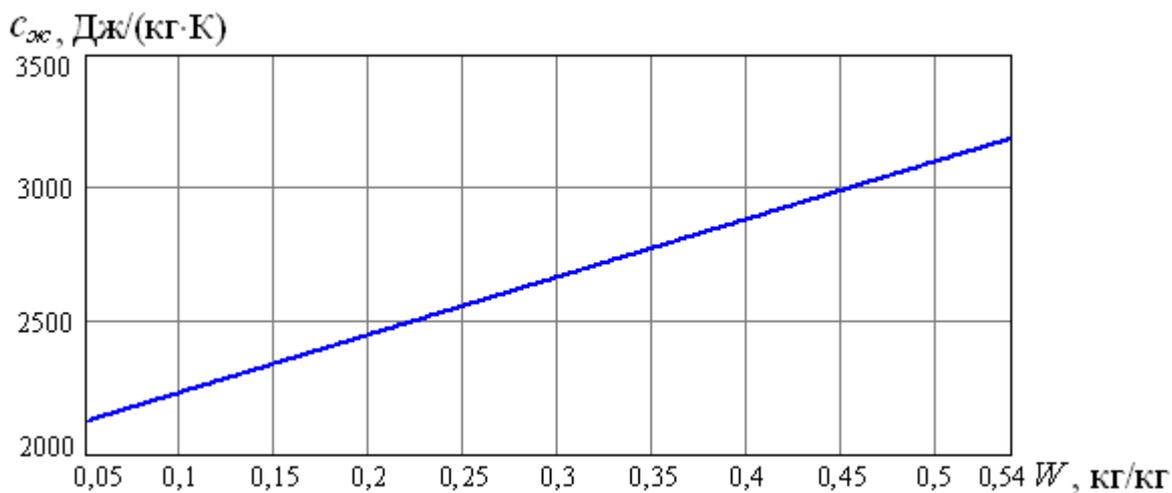


Рисунок 2.9 - Зависимость удельной теплоемкости желтка $c_{ж}$ для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

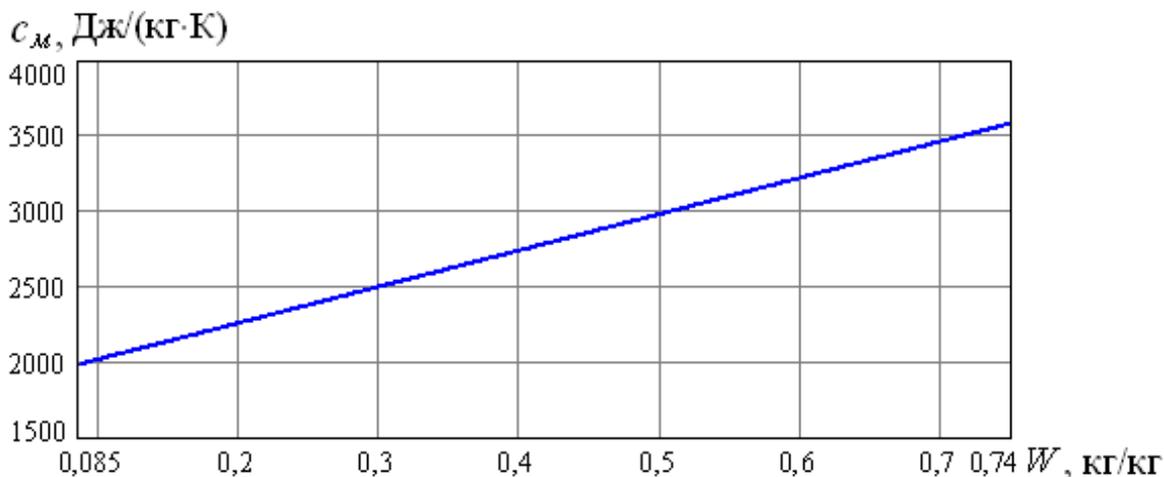


Рисунок 2.10 - Зависимость удельной теплоемкости меланжа c_m для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

По правилу аддитивности можно определить удельную теплоемкость меланжа по известным значениям теплоемкости белка и желтка для любого соотношения желток/белок в продукте:

$$c_m = c_{\text{б}} \cdot X_{\text{б}} + c_{\text{ж}} \cdot X_{\text{ж}} \quad (2.16),$$

где $X_{\text{б}}$, $X_{\text{ж}}$ – концентрация, соответственно белка и желтка в меланже, кг/кг.

В среднем [139,141] можно принять:

$$c_m = 0,667 \cdot c_{\text{б}} + 0,333 \cdot c_{\text{ж}} \quad (2.17).$$

Из анализа данных литературных источников [42] следует, что изменение температуры продуктов в диапазоне 278К – 333К (таблица 2.1) не приводит к значительному изменению удельной теплоемкости белка, желтка и меланжа. С

повышением температуры удельная теплоемкость немного увеличивается. При одинаковых температуре и влажности теплоемкость желтка больше, чем белка, что объясняется большим содержанием жира в желтке.

При увеличении влажности (рисунок 2.8 – 2.10) для всех яичных продуктов наблюдается увеличение удельной теплоемкости с постепенным приближением значений в области высокой влажности к теплоемкости воды. Полученные уравнения 2.11, 2.13, 2.15, 2.16 и 2.17 могут быть использованы в инженерной практике при моделировании и проектировании производственных процессов и аппаратов в технологии яичных продуктов.

2.1.3 Исследование теплопроводности яичных продуктов

Для экспериментального определения теплопроводности яичных продуктов использован метод линейного источника тепла, который основан на закономерности развития теплового процесса в первоначальной стадии процесса охлаждения или нагревания [77,106]. Характерной особенностью метода является зависимость результатов экспериментов от начальных условий. В качестве начальных условий должно соблюдаться условие постоянства и равенства температур во всех пространственных точках объема исследуемого образца.

Метод [77,106] основан на решении дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (3.18),$$

где τ – время процесса, с; t – температура зонда, °С; r – радиус зонда, м; λ – коэффициент теплопроводности исследуемого образца, Вт/(м·К); a – коэффициент температуропроводности исследуемого образца, м²/с.

Краевые условия [77,106]:

$$\begin{array}{lll} \tau = 0 & r \neq 0 & t = 0 \\ \tau > 0 & r = \infty & t = 0 \\ \tau > 0 & r \rightarrow 0 & -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial r} = q = const, \end{array}$$

где q – мощность, выделяемая единицей длины зонда, Вт/м.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности имеет вид [77,106]:

$$t = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(-0,5772 + \ln \frac{4a\tau}{r^2} + \frac{r^2}{4 \cdot a \cdot \tau \cdot 1 \cdot 1!} - \frac{r^4}{16 \cdot a^2 \cdot \tau^2 \cdot 2 \cdot 2!} + \dots \right) \quad (3.19),$$

где 0,5772 – константа Эйлера.

Учитывая, малые значения текущего времени процесса и радиуса зонда, установлена упрощенная формула для коэффициента теплопроводности [77,106]:

$$\lambda = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot t} \cdot \left(-0,5772 + \ln \frac{4 \cdot a \cdot \tau}{r^2} \right) \quad (3.20)$$

В случаях, если коэффициент температуропроводности опытного образца a неизвестен, то определяется среднее λ_{cp} значение теплопроводности при изменении температуры зонда от t_1 до t_2 , для соответствующих моментов времени τ_1 и τ_2 по формуле [77,106]:

$$\lambda_{cp} = \frac{q}{4\pi(t_2 - t_1)} \ln \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad (3.21)$$

Таблица 2.8 - Результаты экспериментального определения теплопроводности белка и их статистической обработки

W , кг/кг	T , К	λ_1 , Вт/ (м·К)	λ_2 , Вт/ (м·К)	λ_3 , Вт/ (м·К)	λ , Вт/ (м·К)	S_n , Вт/ (м·К)	S_λ , Вт/ (м·К)	$\Delta\lambda$, Вт/ (м·К)	ε_λ , %
0,882	278	0,511	0,514	0,525	0,517	0,007	0,004	0,018	3,540
	313	0,541	0,543	0,545	0,543	0,002	0,001	0,005	0,914
	333	0,569	0,568	0,557	0,565	0,007	0,004	0,017	2,926
0,6	278	0,304	0,308	0,32	0,311	0,008	0,005	0,021	6,647
	313	0,328	0,333	0,34	0,334	0,006	0,003	0,015	4,480
	333	0,335	0,358	0,36	0,351	0,014	0,008	0,034	9,826
0,4	278	0,152	0,138	0,142	0,144	0,007	0,004	0,018	12,432
	313	0,161	0,166	0,172	0,166	0,006	0,003	0,014	8,237
	333	0,171	0,181	0,184	0,179	0,007	0,004	0,017	9,441
0,09	278	0,023	0,024	0,025	0,024	0,001	0,001	0,002	10,344
	313	0,032	0,032	0,035	0,033	0,002	0,001	0,004	13,030
	333	0,043	0,045	0,04	0,043	0,003	0,001	0,006	14,530

Таблица 2.9 - Результаты экспериментального определения теплопроводности желтка
и их статистической обработки

W , кг/кг	T , К	λ_1 , Вт/ (м·К)	λ_2 , Вт/ (м·К)	λ_3 , Вт/ (м·К)	λ , Вт/ (м·К)	S_n , Вт/ (м·К)	S_λ , Вт/ (м·К)	$\Delta\lambda$ Вт/ (м·К)	ε_λ , %
0,54	278	0,328	0,321	0,333	0,327	0,006	0,003	0,015	4,576
	313	0,347	0,34	0,353	0,347	0,007	0,004	0,016	4,655
	333	0,367	0,372	0,378	0,372	0,006	0,003	0,014	3,676
0,45	278	0,241	0,239	0,228	0,236	0,007	0,004	0,017	7,364
	313	0,24	0,254	0,261	0,252	0,011	0,006	0,027	10,534
	333	0,261	0,275	0,288	0,275	0,014	0,008	0,034	12,190
0,35	278	0,123	0,135	0,135	0,131	0,007	0,004	0,017	13,130
	313	0,139	0,154	0,151	0,148	0,008	0,005	0,020	13,314
	333	0,166	0,164	0,154	0,161	0,006	0,004	0,016	9,914
0,05	278	0,016	0,017	0,015	0,016	0,001	0,001	0,002	15,516
	313	0,02	0,022	0,022	0,021	0,001	0,001	0,003	13,651
	333	0,028	0,027	0,029	0,028	0,001	0,001	0,002	8,866

Таблица 2.10 - Результаты экспериментального определения теплопроводности меланжа
и их статистической обработки

W , кг/кг	T , К	λ_1 , Вт/(м· К)	λ_2 , Вт/(м· К)	λ_3 , Вт/(м· К)	λ , Вт/(м· К)	S_n , Вт/(м· К)	S_λ , Вт/(м· К)	$\Delta\lambda$ Вт/(м· К)	ε_λ , %
0,75	278	0,447	0,462	0,478	0,462	0,016	0,009	0,038	8,331
	313	0,46	0,478	0,493	0,477	0,017	0,010	0,041	8,599
	333	0,481	0,499	0,513	0,498	0,016	0,009	0,040	7,997
0,6	278	0,276	0,287	0,288	0,284	0,007	0,004	0,017	5,820
	313	0,301	0,303	0,319	0,308	0,010	0,006	0,024	7,952
	333	0,317	0,311	0,312	0,313	0,003	0,002	0,008	2,550
0,4	278	0,121	0,126	0,125	0,124	0,003	0,002	0,007	5,297
	313	0,152	0,151	0,141	0,148	0,006	0,004	0,015	10,203
	333	0,157	0,163	0,162	0,161	0,003	0,002	0,008	4,957
0,085	278	0,02	0,019	0,018	0,019	0,001	0,001	0,002	13,066
	313	0,03	0,03	0,032	0,031	0,001	0,001	0,003	9,247
	333	0,036	0,036	0,038	0,037	0,001	0,001	0,003	7,748

Таблица 2.11 - Результаты экспериментального определения теплопроводности
белка λ_b , Вт/(м·К)

№ п/п	T, К	W, кг/кг			
		0,882	0,6	0,4	0,09
1	278	0,517	0,311	0,144	0,024
2	313	0,543	0,334	0,166	0,033
3	333	0,565	0,351	0,179	0,043

Таблица 2.12 - Результаты экспериментального определения теплопроводности
желтка $\lambda_{жс}$, Вт/(м·К)

№ п/п	T, К	W, кг/кг			
		0,54	0,45	0,35	0,05
1	278	0,327	0,236	0,131	0,016
2	313	0,347	0,252	0,148	0,021
3	333	0,372	0,275	0,161	0,028

Таблица 2.13 - Результаты экспериментального определения теплопроводности
меланжа λ_m , Вт/(м·К)

№ п/п	T, К	W, кг/кг			
		0,75	0,6	0,4	0,085
1	278	0,462	0,284	0,124	0,019
2	313	0,477	0,308	0,148	0,031
3	333	0,498	0,313	0,161	0,037

Отличием истинного λ от среднего значения λ_{cp} для большинства исследуемых материалов можно пренебречь, поскольку изменение температуры зонда не превышает нескольких градусов, а значения температурного коэффициента теплопроводности малы.

Результаты экспериментального определения теплопроводности яичных продуктов представлены в таблицах 2.8 – 2.13. Вычисление погрешностей при определении теплопроводности выполнялось в традиционной последовательности, описанной выше (формулы 2.2 – 2.6) [55,97].

Относительная погрешность при определении теплопроводности яичных продуктов λ не превышала $\varepsilon_\lambda = 15,516\%$.

Для математического описания экспериментальные данные (таблицы 2.8 – 2.13) аппроксимированы методом точного попадания в узловые точки и получены функциональные зависимости $\lambda = f(W, T)$, при этом величина достоверности аппроксимации составляла $R^2=0,99$.

Функциональная зависимость теплопроводности белка:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{б}} = & (-0,00008381 \cdot T^2 + 0,05256859 \cdot T - 9,51924974) \cdot W^3 + \\ & (0,00014738 \cdot T^2 - 0,09247771 \cdot T + 16,70412007) \cdot W^2 + \\ & + (-0,0000681 \cdot T^2 + 0,04345862 \cdot T - 7,31823056) \cdot W + \\ & (0,00000941 \cdot T^2 - 0,00555272 \cdot T + 0,86696502) \end{aligned} \quad (2.22).$$

Функциональная зависимость теплопроводности желтка:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ж}} = & (0,00008128 \cdot T^2 - 0,04907462 \cdot T + 8,62430954) \cdot W^2 + \\ & (-0,0000269 \cdot T^2 + 0,01733185 \cdot T - 2,84106206) \cdot W + \\ & + (0,00000469 \cdot T^2 - 0,00269459 \cdot T + 0,40404506) \end{aligned} \quad (2.23).$$

Функциональная зависимость теплопроводности меланжа:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{м}} = & (0,00008857 \cdot T^2 - 0,05527926 \cdot T + 9,48766531) \cdot W^2 + \\ & (-0,00006228 \cdot T^2 + 0,03942148 \cdot T - 6,28777592) \cdot W + \\ & + (0,00000493 \cdot T^2 - 0,00277743 \cdot T + 0,41555978) \end{aligned} \quad (2.24).$$

На рисунках 2.14, 2.16 и 2.18 представлены зависимости теплопроводности яйцепродуктов от их влажности для различных температур, полученные с использованием формул 2.22 – 2.24. На рисунках 2.15, 2.17 и 2.19 приведены поля значений теплопроводности яйцепродуктов.

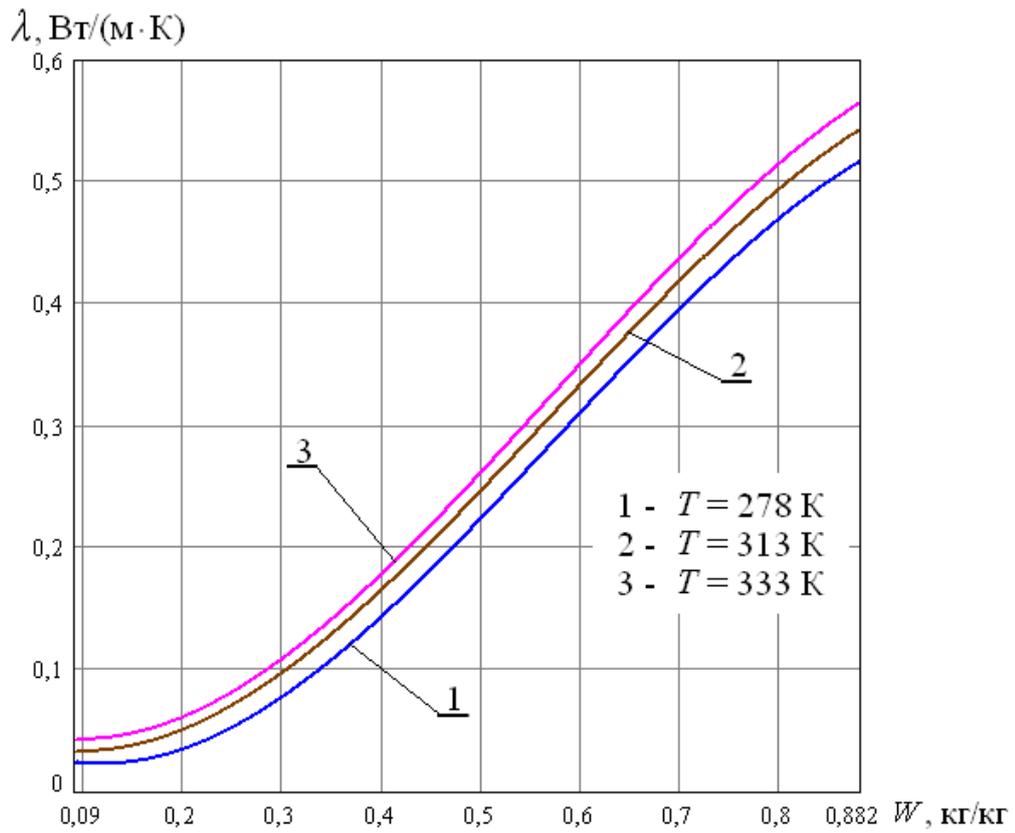


Рисунок 2.14 - Зависимость теплопроводности белка λ_δ для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

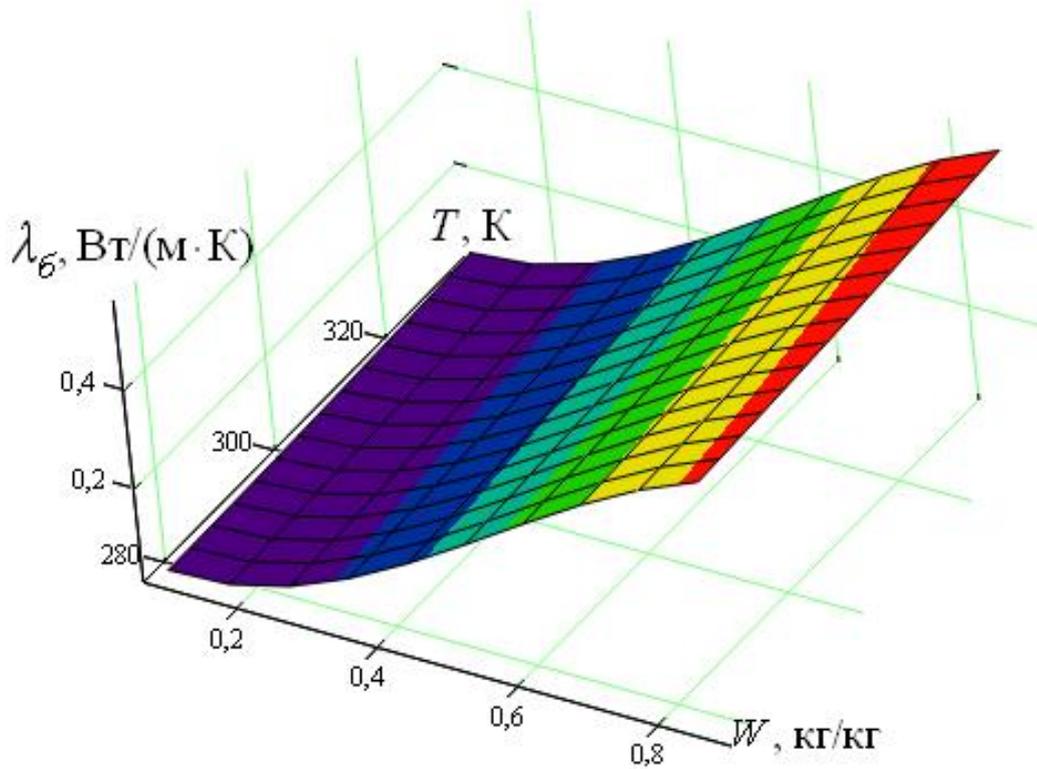


Рисунок 2.15 - Поле значений теплопроводности белка λ_δ для $T = 278 - 333 \text{ K}$, $W = 0,09 - 0,882 \text{ кг}/\text{кг}$

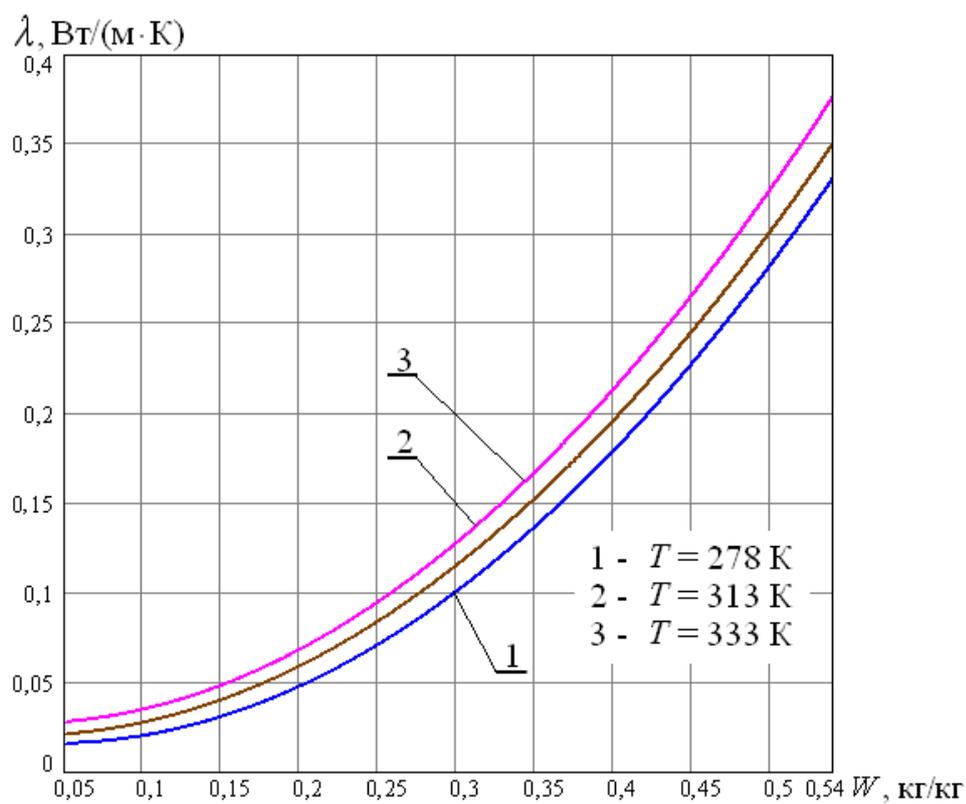


Рисунок 2.16 - Зависимость теплопроводности желтка $\lambda_{жс}$ для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

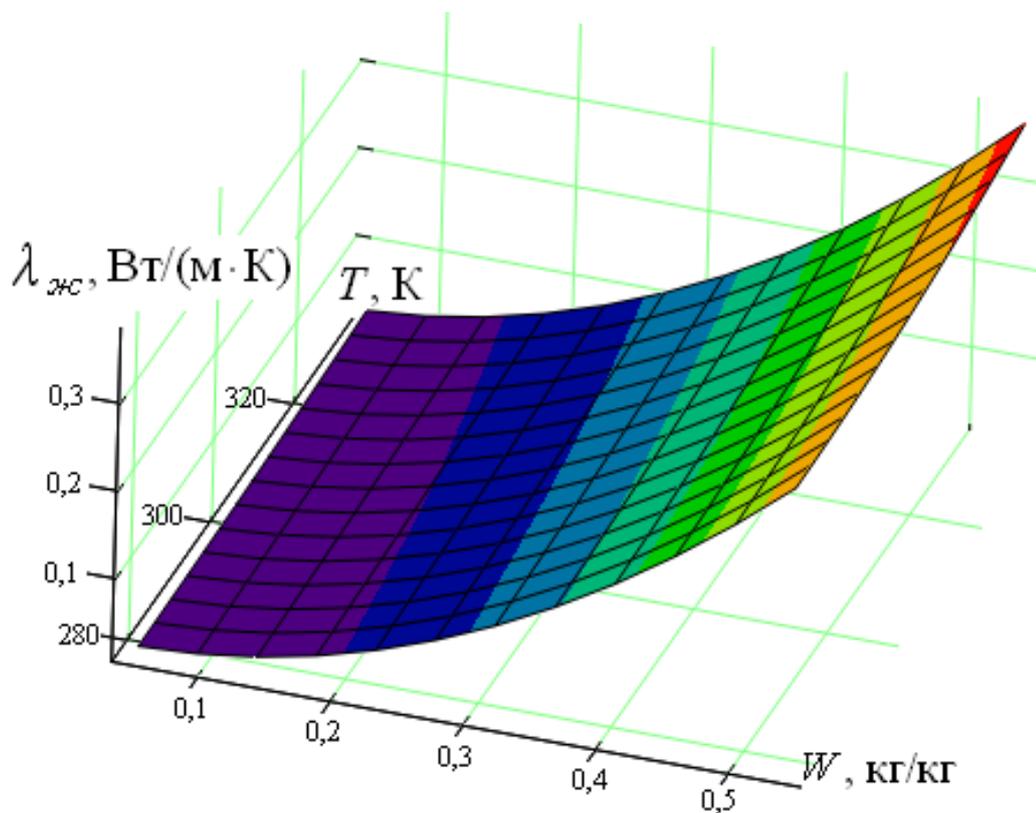


Рисунок 2.17 - Поле значений теплопроводности желтка $\lambda_{жс}$ для $T = 278 - 333 \text{ K}$, $W = 0,05 - 0,54 \text{ кг}/\text{кг}$

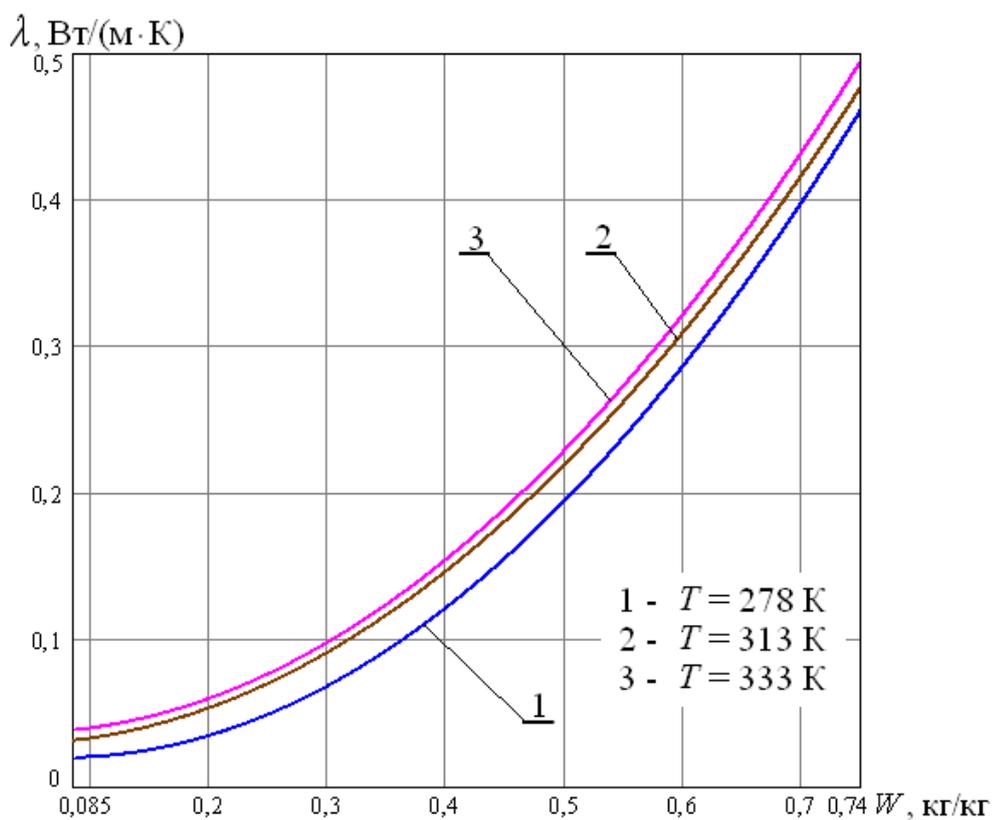


Рисунок 2.18 - Зависимость теплопроводности меланжа λ_m для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

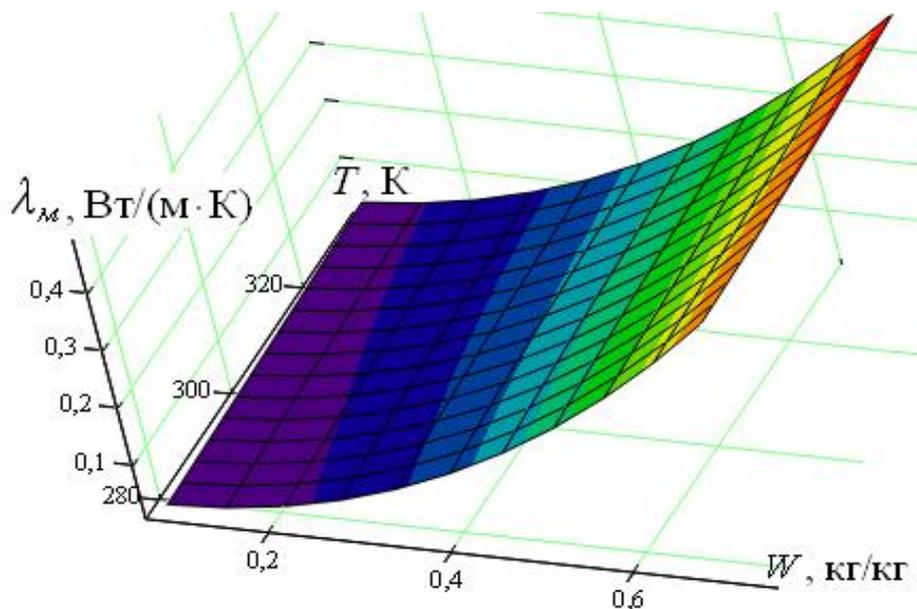


Рисунок 2.19 - Поле значений теплопроводности меланжа λ_m для $T = 278 - 333 \text{ К}$, $W = 0,085 - 0,75 \text{ кг}/\text{кг}$

Функциональные зависимости 2.22 – 2.24 позволяют определять с любой точностью численные значения теплопроводности в диапазонах фактического изменения температуры и влажности продукта в процессе его обезвоживания.

Из анализа рисунков 2.14 – 2.19, построенных по экспериментальным данным, следует, что зависимости теплопроводности от влажности и температуры яичных продуктов носят нелинейный характер, что характерно для большинства биополимерных продуктов животного происхождения.

Таким образом, в ходе экспериментально-аналитического изучения теплопроводности яичных продуктов проведена систематизация и обобщение данных, получены и проанализированы функциональные зависимости теплопроводности для изменения влажности и температуры в процессе сушки, с целью дальнейшего использования в инженерной практике. Кроме того, результаты необходимы для научного анализа кинетики и динамики тепломассообменных процессов, их моделирования и оптимизации с целью энерго- и ресурсосбережения при обезвоживании яичных продуктов.

2.1.4 Исследование температуропроводности яичных продуктов

Зависимость коэффициента температуропроводности a от влияющих факторов имеет вид:

$$a(W, T) = \frac{\lambda(W, T)}{c(W) \cdot \rho(W, T)}. \quad (2.25)$$

С учетом ранее полученных функциональных зависимостей $\rho(W, T)$, $c(W)$ и $\lambda(W, T)$, для белка, для желтка и для меланжа по формуле 2.25 определены коэффициенты температуропроводности белка a_b , желтка $a_{жс}$ и меланжа a_m .

На рисунках 2.20, 2.22 и 2.24 представлены зависимости температуропроводности яйцепродуктов от их влажности для различных температур, полученные с использованием формулы 2.25. На рисунках 2.21, 2.23 и 2.25 приведены поля значений температуропроводности яйцепродуктов для фактического изменения температуры и влажности продукта в процессе сушки.

Зависимость 2.25 позволяет определять с любой точностью численные значения температуропроводности при изменении влажности и температуры продукта в процессе его обезвоживания.

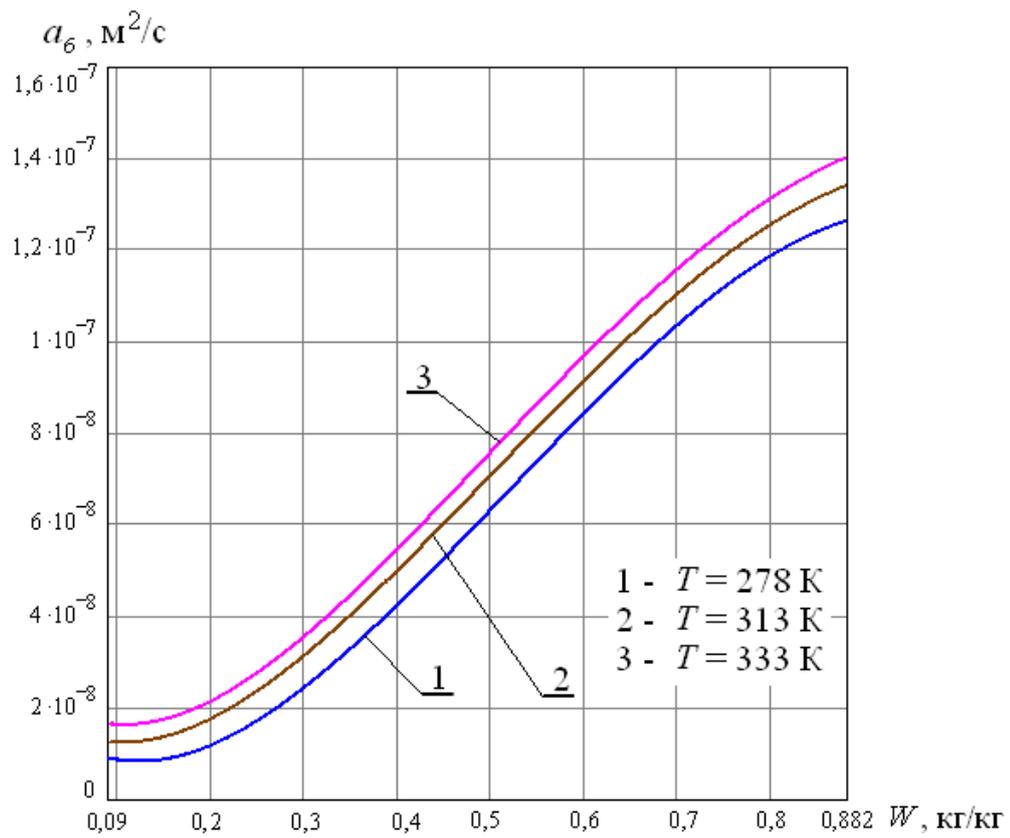


Рисунок 2.20 - Зависимость температуропроводности белка a_6 для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

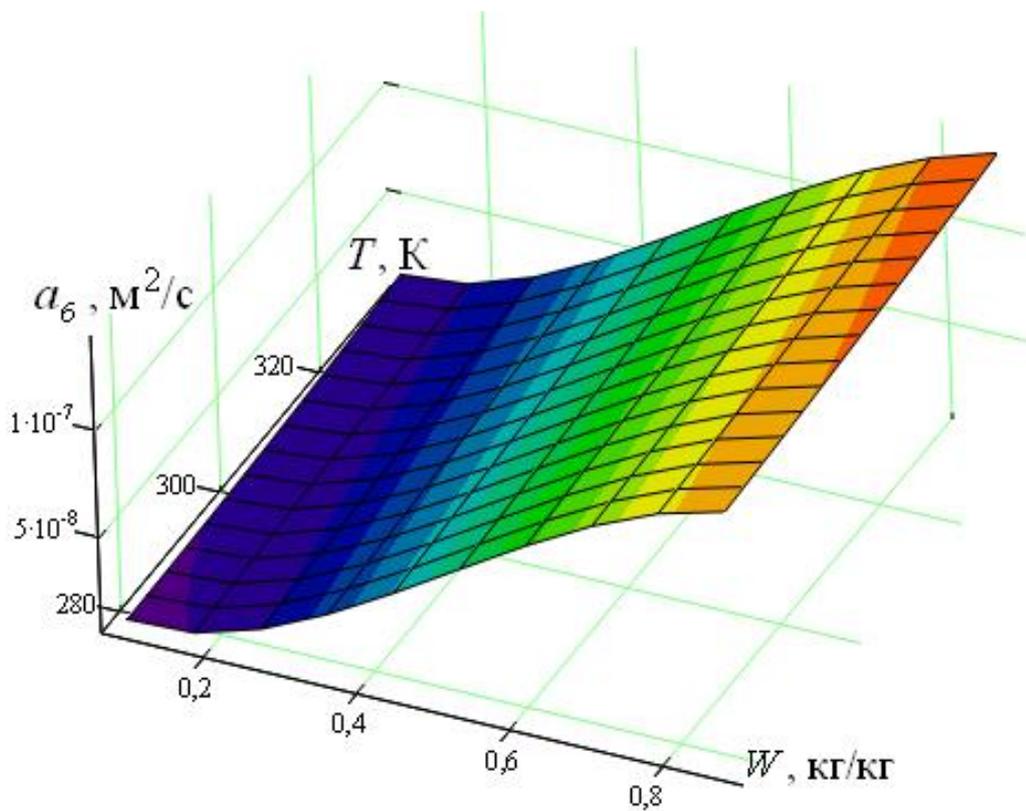


Рисунок 2.21 - Поле значений температуропроводности белка a_6 для $T = 278 - 333$ K, $W = 0,09 - 0,882$ kg/kg

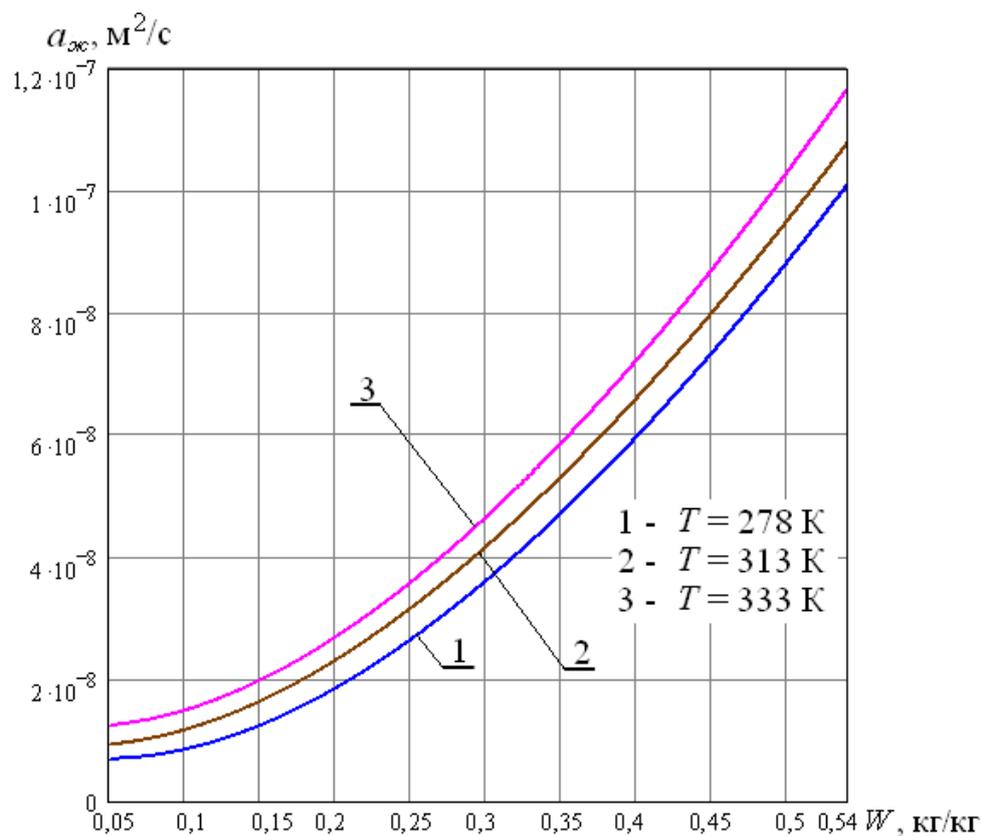


Рисунок 2.22 - Зависимость температуропроводности желтка $a_{жс}$ для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

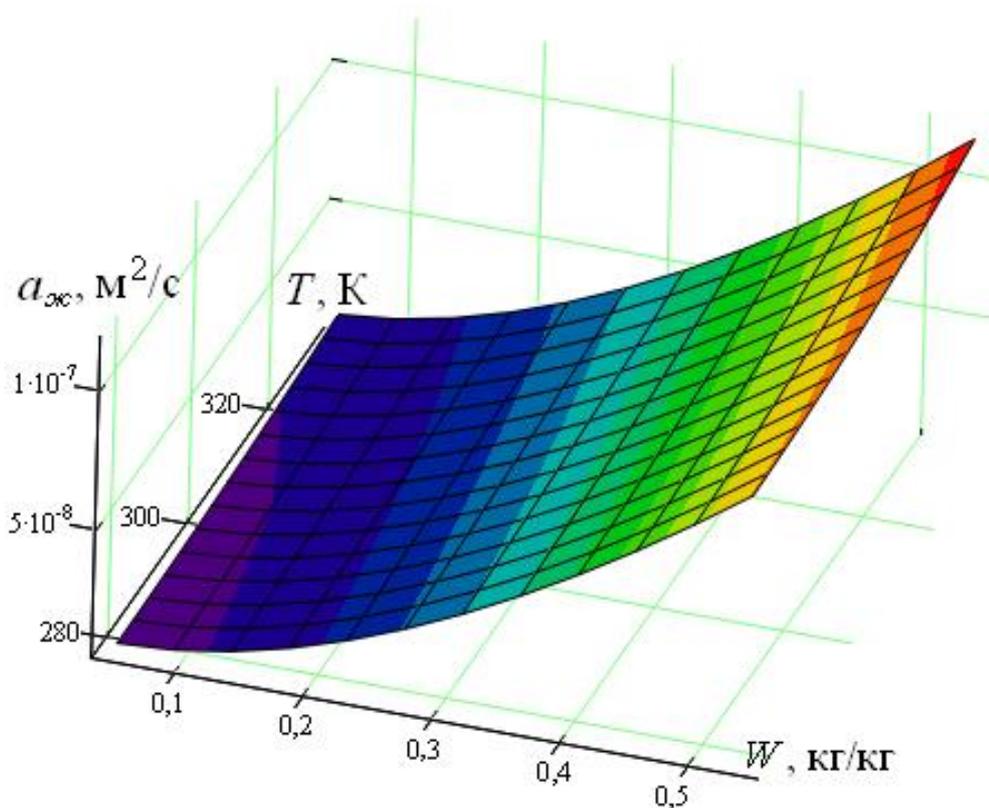


Рисунок 2.23 - Поле значений температуропроводности желтка $a_{жс}$ для $T = 278 - 333 \text{ K}$, $W = 0,05 - 0,54 \text{ кг/кг}$

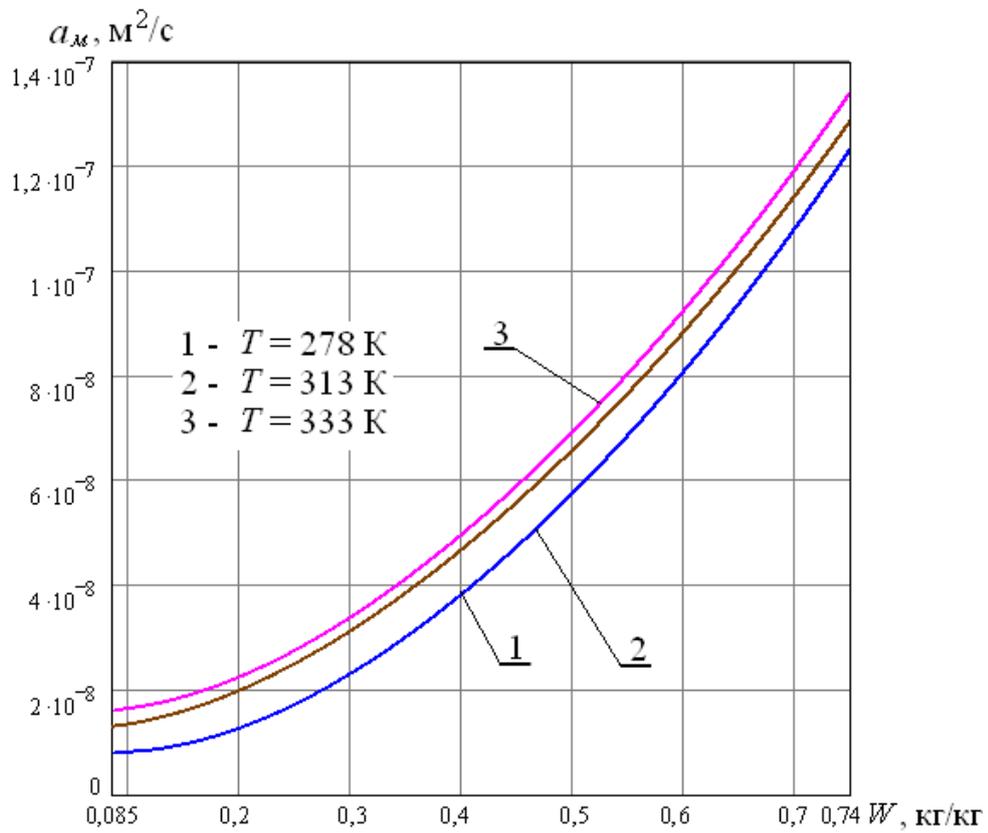


Рисунок 2.24 - Зависимость температуропроводности меланжа a_m для реального диапазона изменения влажности в процессе сушки

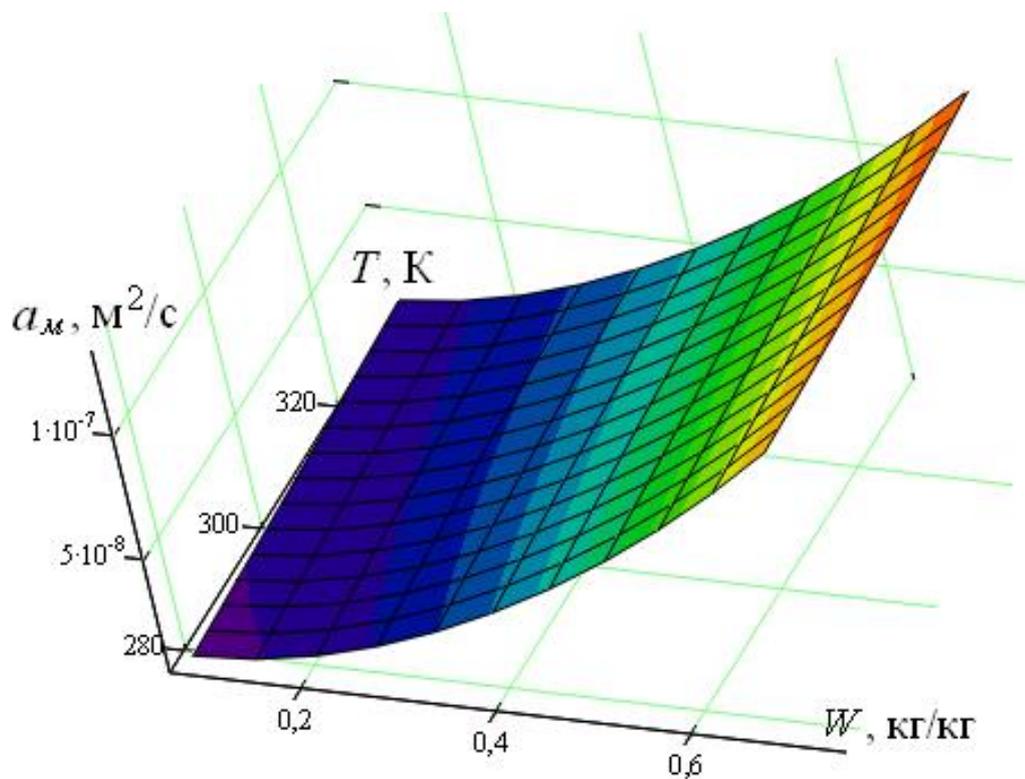


Рисунок 2.25 - Поле значений температуропроводности меланжа a_m для $T = 278 - 333 \text{ K}$, $W = 0,085 - 0,75 \text{ кг/кг}$

Из анализа рисунков 2.20 – 2.25, следует, что зависимости температуропроводности от влажности и температуры яичных продуктов носят нелинейный характер, что характерно для большинства биополимерных продуктов животного происхождения.

Таким образом, проведена систематизация и обобщение данных по температуропроводности для диапазонов фактического изменения температуры и влажности продукта в процессе сушки, для дальнейшего использования в инженерной практике, а также для научного анализа кинетики и динамики тепломассообменных процессов, их моделирования и оптимизации с целью энерго- и ресурсосбережения при обезвоживании яичных продуктов.

2.2 Механизм взаимодействия яичных продуктов с водой

Так как сушка пищевых продуктов протекает, в том числе и в области гигроскопического состояния, очевидно влияние явлений связывания влаги с сухими веществами на характер протекания тепломассообменных процессов, что необходимо учитывать при разработке рациональных способов влагоудаления и конструкторских решений для их осуществления.

В теории и практике обезвоживания пищевых продуктов значительное внимание уделяется исследованию статике процессов сушки, которая посвящена изучению взаимодействия между влажным газом и материалом, в результате которого они стремятся к гигротермическому равновесному состоянию [44]. Кривые сорбции (десорбции), которые позволяют классифицировать влагу по виду и энергии ее связи с материалом.

Исследовались гигроскопические свойства яичного белка, желтка и меланжа. Исследования выполнялись тензиметрическим методом Ван Бамелена [44]. Согласно методу Ван Бамелена, экспериментальные образцы исследуемого продукта с определенной начальной влажностью выдерживались в эксикаторах над водным раствором серной кислоты для создания в эксикаторе при соответствующей температуре T , K определенного значения относительной влажности воздуха φ , %.

Определение характеризующей гигроскопичность равновесной влажности W_p , кг/кг в продукте осуществлялось на экспериментальной установке (рисунок 2.26), включающей (рисунок 2.27): эксикатор 4 с водным раствором серной кислоты 5; аналитические весы 1 Adventurer OHAUS AR3130 соответствующие второму классу точности по ГОСТ 24104-88 (допускаемая основная погрешность – не более 0,1%); хромель-копелевую термопару 3 ХК(L) ТП-011 (статические характеристики по ГОСТ Р 8.585-2001, допускаемая основная погрешность – не более 0,5 К), подключаемую к мультиметру 6.



Рисунок 2.26 - Экспериментальная установка для определения гигроскопических свойств пищевых продуктов методом Ван Бамелена (общий вид)

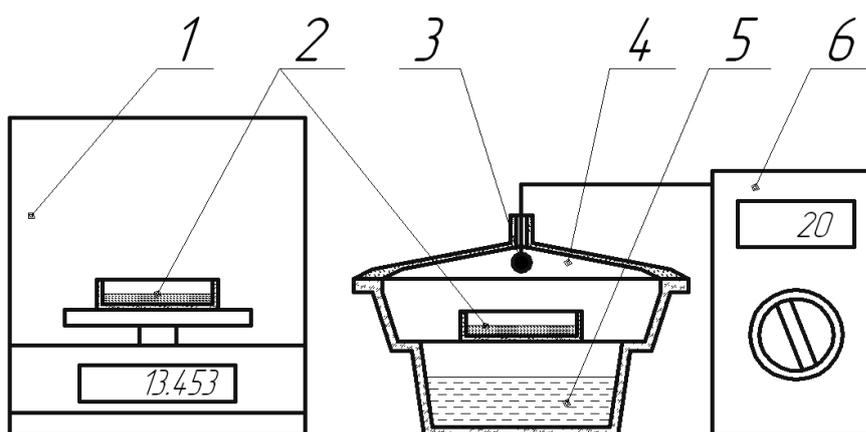


Рисунок 2.27 - Схема экспериментальной установки для исследования гигроскопических характеристик пищевых продуктов методом Ван Бамелена: 1 – весы; 2 – продукт; 3 – термопара; 4 – эксикатор; 5 – раствор кислоты; 6 – мультиметр

Определение W_p осуществлялось в диапазоне $\varphi = 10..100\%$, для значений $T = 278\text{K}$ и $T = 333\text{K}$. Значения температуры T соответствуют пределам реального

изменения температуры в процессе обезвоживания (таблица 2.1). Экспериментальные исследования проводились при 3-х повторениях.

Для определения гигроскопической влажности и построения изотерм сорбции использовались экспериментальные образцы в виде порошков, полученные конвективной сушкой распылением яичных продуктов.

Начальная влажность образцов $W_{образца}$ до помещения их в эксикатор составляла: белок – 0,09 кг/кг; желток – 0,05 кг/кг; меланж – 0,085 кг/кг.

В ходе экспериментов образцы выдерживались над водным раствором серной кислоты в эксикаторе при постоянной температуре и периодически извлекались из эксикатора и взвешивались до достижения постоянной массы навески, при которой их влажность соответствовала равновесной.

Равновесная влажность образцов W_p рассчитывалась по формуле:

$$W_p = \frac{G_2 - G_1 \cdot (1 - W_{образца})}{G_2} \quad (2.26),$$

где G_1 – начальная масса образца, кг; $W_{образца}$ – начальная влажность образца, кг/кг; G_2 – масса образца соответствующая гигротермическому равновесию, кг.

Вычисление погрешностей при определении равновесной влажности продукта выполнялось в традиционной последовательности [55,97]:

- Составление таблицы измерений; определение среднего значения равновесной влажности:

$$\overline{W_p} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n W_{pi} \quad (2.27),$$

где $n = 3$ – число измерений в выборке, W_{pi} – численное значение измеренной влажности, $i = 1, 2 \dots n$.

- Определение единичных отклонений $\Delta W_{pi} = W_{pi} - \overline{W_p}$, проверка согласия с соотношением $\sum_1^n \Delta W_{pi} = 0$; вычисление квадратов отклонений $(\Delta W_{pi})^2$;

определение средних квадратичных отклонений:

$$S_n = \sqrt{\sum_1^n (\Delta W_{pi})^2 / (n - 1)} \quad (2.28).$$

- Выявление и исключение промахов из таблицы измерений (промахи измерения – при которых $\Delta W_{p_i} > 2S_n$ и определение средних квадратичных отклонений среднего:

$$S_{\overline{W_p}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta W_{p_i})^2}{(n \cdot (n-1))}} \quad (2.29).$$

- определение критерия Стьюдента $t_{an} = 4,3$ и вычисление погрешности результатов измерений:

$$\Delta W_p = t_{an} \cdot S_{\overline{W_p}} \quad (2.30).$$

- определение относительных погрешностей

$$\varepsilon_{W_p} = \frac{\Delta W_p}{W_p} \cdot 100\% \quad (2.31).$$

Таблица 2.14 - Результаты экспериментального определения равновесной влажности белка и их статистической обработки

T, K	$\varphi,$ кг/кг	$W_{p1},$ кг/кг	$W_{p2},$ кг/кг	$W_{p3},$ кг/кг	$W_p,$ кг/кг	$S_n,$ кг/кг	$S_{Wp},$ кг/кг	ΔW_{p_3} кг/М ³	$\varepsilon_{Wp},$ %
333	0,1	0,061	0,063	0,067	0,064	0,003	0,002	0,008	11,851
	0,2	0,124	0,123	0,121	0,123	0,002	0,001	0,004	3,083
	0,4	0,202	0,201	0,189	0,197	0,007	0,004	0,018	9,117
	0,6	0,267	0,263	0,258	0,263	0,005	0,003	0,011	4,257
	0,8	0,319	0,323	0,329	0,324	0,005	0,003	0,012	3,857
	1	0,381	0,391	0,381	0,384	0,006	0,003	0,014	3,733
278	0,1	0,068	0,073	0,071	0,071	0,003	0,001	0,006	8,800
	0,2	0,131	0,136	0,139	0,135	0,004	0,002	0,010	7,432
	0,4	0,218	0,216	0,209	0,214	0,005	0,003	0,012	5,482
	0,6	0,294	0,284	0,282	0,287	0,006	0,004	0,016	5,561
	0,8	0,361	0,347	0,346	0,351	0,008	0,005	0,021	5,932
	1	0,416	0,418	0,429	0,421	0,007	0,004	0,017	4,128

Таблица 2.15 - Результаты экспериментального определения равновесной влажности желтка и их статистической обработки

T, K	$\varphi, \text{кг/кг}$	$W_{p1}, \text{кг/кг}$	$W_{p2}, \text{кг/кг}$	$W_{p3}, \text{кг/кг}$	$W_p, \text{кг/кг}$	$S_n, \text{кг/кг}$	$S_{Wp}, \text{кг/кг}$	$\Delta W_p, \text{кг/м}^3$	$\varepsilon_{Wp}, \%$
333	0,1	0,015	0,016	0,016	0,016	0,001	0,000	0,001	8,958
	0,2	0,033	0,031	0,03	0,031	0,002	0,001	0,004	12,233
	0,4	0,063	0,059	0,061	0,061	0,002	0,001	0,005	8,140
	0,6	0,082	0,083	0,081	0,082	0,001	0,001	0,002	3,028
	0,8	0,105	0,103	0,096	0,101	0,005	0,003	0,012	11,616
	1	0,128	0,118	0,119	0,122	0,006	0,003	0,014	11,207
278	0,1	0,016	0,017	0,017	0,017	0,001	0,000	0,001	8,431
	0,2	0,032	0,035	0,034	0,034	0,002	0,001	0,004	11,154
	0,4	0,061	0,065	0,067	0,064	0,003	0,002	0,008	11,851
	0,6	0,091	0,088	0,085	0,088	0,003	0,002	0,007	8,463
	0,8	0,103	0,11	0,115	0,109	0,006	0,003	0,015	13,729
	1	0,136	0,135	0,123	0,131	0,007	0,004	0,018	13,710

Таблица 2.16 - Результаты экспериментального определения равновесной влажности меланжа и их статистической обработки

T, K	$\varphi, \text{кг/кг}$	$W_{p1}, \text{кг/кг}$	$W_{p2}, \text{кг/кг}$	$W_{p3}, \text{кг/кг}$	$W_p, \text{кг/кг}$	$S_n, \text{кг/кг}$	$S_{Wp}, \text{кг/кг}$	$\Delta W_p, \text{кг/м}^3$	$\varepsilon_{Wp}, \%$
333	0,1	0,028	0,027	0,029	0,028	0,001	0,001	0,002	8,866
	0,2	0,056	0,059	0,062	0,059	0,003	0,002	0,007	12,623
	0,4	0,09	0,091	0,095	0,092	0,003	0,002	0,007	7,140
	0,6	0,125	0,122	0,131	0,126	0,005	0,003	0,011	9,029
	0,8	0,145	0,152	0,156	0,151	0,006	0,003	0,014	9,154
	1	0,17	0,169	0,173	0,171	0,002	0,001	0,005	3,022
278	0,1	0,028	0,03	0,029	0,029	0,001	0,001	0,002	8,561
	0,2	0,061	0,059	0,063	0,061	0,002	0,001	0,005	8,140
	0,4	0,106	0,104	0,099	0,103	0,004	0,002	0,009	8,690
	0,6	0,132	0,131	0,14	0,134	0,005	0,003	0,012	9,139
	0,8	0,159	0,161	0,168	0,163	0,005	0,003	0,012	7,198
	1	0,182	0,198	0,201	0,194	0,010	0,006	0,025	13,071

Результаты исследований представлены в таблицах 2.14 – 2.16, где: W_{p1} , W_{p2} , и W_{p3} – равновесные влажности определенные при соответственно трех

повторениях опыта. Относительная ошибка при определении равновесной влажности продуктов W_p не превышала $\varepsilon_{W_p} = 13,729\%$.

По экспериментальным данным (таблицы 2.14 – 2.16) построены изотермы сорбции водяного пара белком (рисунок 2.28), желтком (рисунок 2.29) и меланжем (рисунок 2.30).

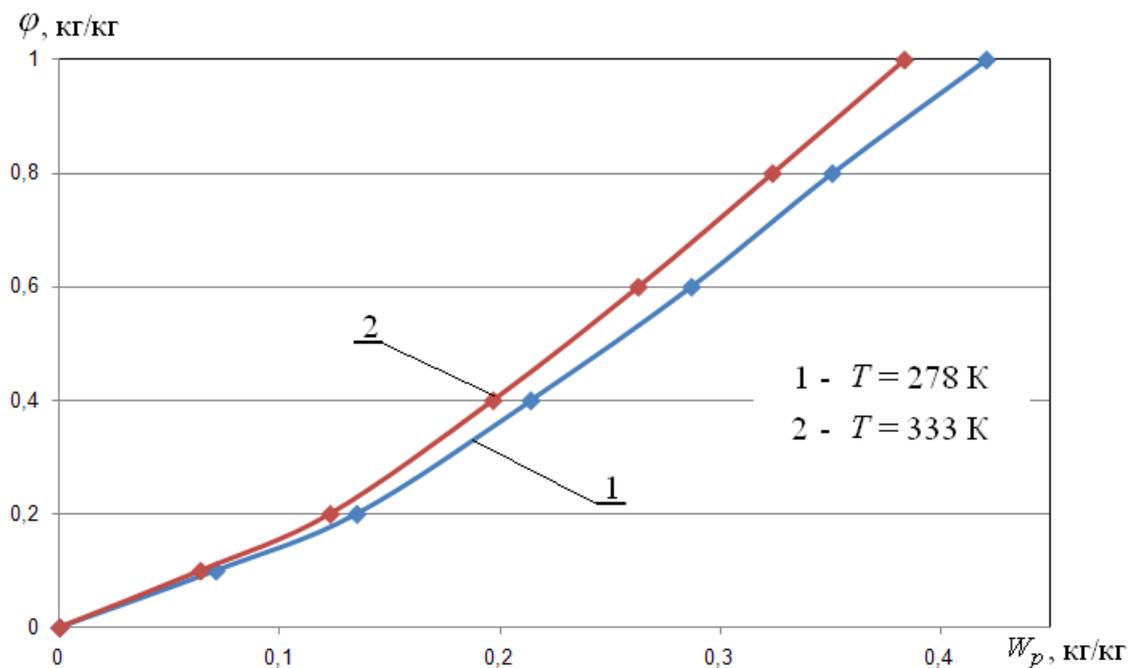


Рисунок 2.28 - Экспериментальные изотермы сорбции водяного пара белком

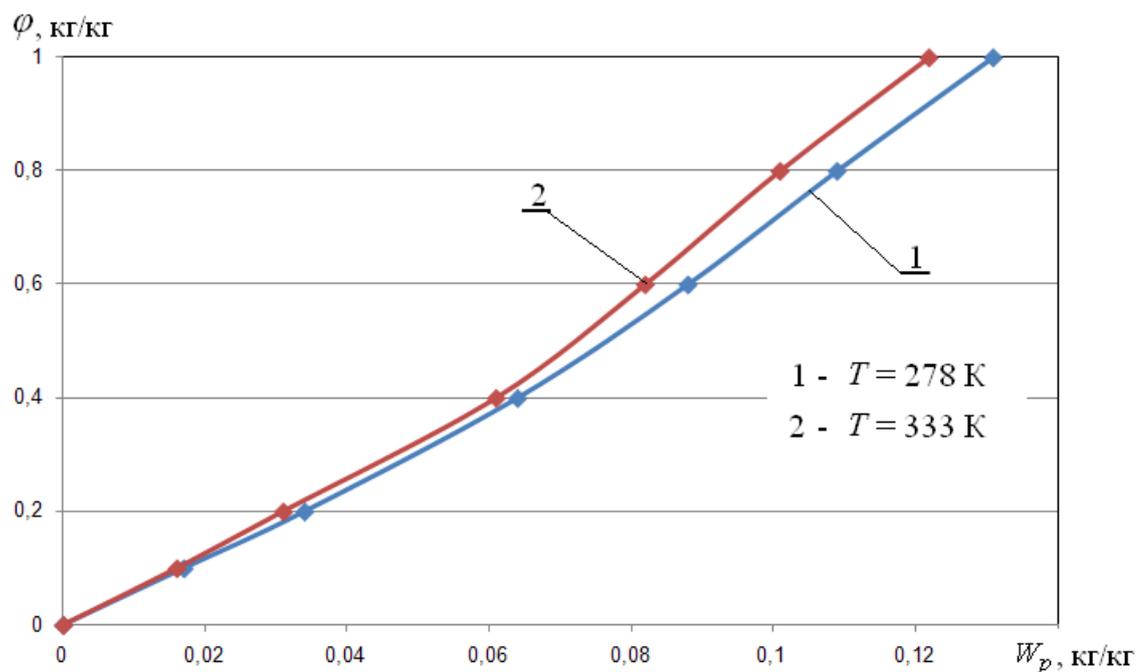


Рисунок 2.29 - Экспериментальные изотермы сорбции водяного пара желтком

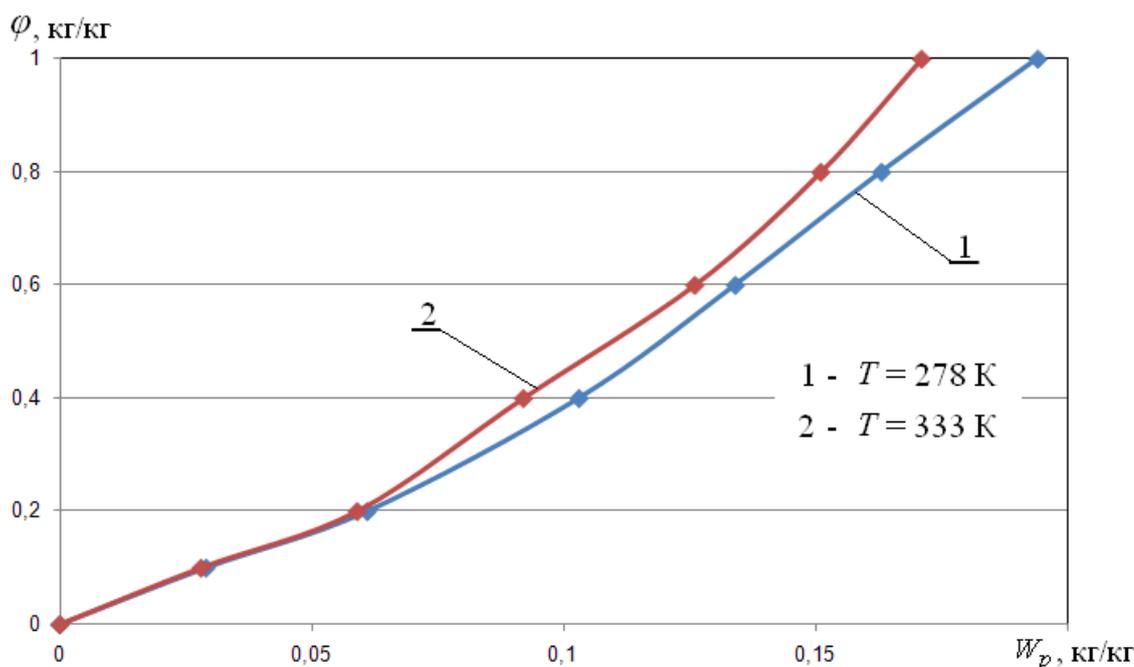


Рисунок 2.30 - Экспериментальные изотермы сорбции водяного пара меланжем

Изотермы сорбции водяного пара исследуемыми материалами (рисунок 2.28 – 2.30) указывают на малую зависимость сорбционной способности яичных продуктов от температуры. При повышении T равновесная влажность образцов W_p уменьшается как и для большинства пищевых систем.

Согласно классификации А.В. Лыкова [85], яичные продукты относятся к наиболее распространенной группе капиллярно-пористых коллоидных тел. Характерны различные формы связи влаги с твердым скелетом, свойственные как капиллярно-пористым, так и коллоидным телам. По классификации БЭТ (С. Брунауэра, Л. Деминга, В. Деминга, Р. Эммета и Б. Теллера) [85], полученные изотермы можно причислить к III типу, для которого характерно значительное влияние различных полярных групп на сорбционную активность.

Молекулы воды являясь диполями и при контакте с полярными группами материала электронная пара водорода смещается к электроотрицательным атомам азота и кислорода, в результате чего около молекул продукта образуется электрическое поле в котором молекулы воды специфически ориентируются [85].

Равновесные влажности при $\phi = 1$ кг/кг являются максимальными – гигроскопическими (таблица 2.17). На изотермах отсутствуют резкие перегибы, что указывает на преобладание свойств ограниченно набухающих коллоидных тел. Гигроскопическая влажность желтка и меланжа, значительно меньше, чем у белка,

что объясняется присутствием в желтке и меланже жиров, которые по отношению к влаге гидрофобны.

Таблица 2.17 - Равновесные гигроскопические влажности яичных продуктов W_p , кг/кг

№ п/п	Продукт	$T = 278\text{K}$	$T = 333\text{K}$
1	Белок	0,421	0,384
2	Желток	0,131	0,122
3	Меланж	0,194	0,171

На участках изотерм $W_p \leq 0,09$ кг/кг для белка, $W_p \leq 0,05$ кг/кг для желтка и $W_p \leq 0,085$ кг/кг для меланжа (рисунок 2.28 – 2.30) сорбционная способность продуктов мало зависит от T . При сорбции паров воды на этих участках образуются энергетически прочные гидратные комплексы (характер гидратации – «кулоновский») за счет адсорбции сольватных молекул воды молекулами поверхности мицелл продуктов. Таким образом, в начале процесса сорбции происходит формирование слоя мономолекулярной адсорбции и сорбция жидкости сопровождается существенным выделением тепла – теплоты гидратации (теплоты набухания).

При $\varphi = 0,8$ кг/кг (рисунок 2.28 – 2.30) для всех яичных продуктов наблюдается плавный перегиб изотерм, что указывает на наличие влаги микро- и макрокапилляров, порах за счет эффекта смачивания. Равновесные влажности, соответствующие точкам перегиба при $\varphi = 0,8$ кг/кг представлены в таблице 2.18.

Таблица 2.18 - Равновесные влажности яичных продуктов W_p , кг/кг при $\varphi = 0,8$ кг/кг

№ п/п	Продукт	$T = 278\text{K}$	$T = 333\text{K}$
1	Белок	0,351	0,324
2	Желток	0,109	0,101
3	Меланж	0,163	0,151

Таким образом, на изотермах яичных продуктах можно выделить три характерных участка (таблице 2.19 и 2.20).

Таблица 2.19 - Участки изотерм сорбции яичных продуктов по W_p , кг/кг при $T = 278\text{K}$

Продукт	1-ый участок	2-ой участок	3-ий участок
Белок	$W_p \leq 0,09$ кг/кг	$0,09$ кг/кг $\leq W_p \leq 0,351$ кг/кг	$W_p > 0,351$ кг/кг
Желток	$W_p \leq 0,05$ кг/кг	$0,05$ кг/кг $\leq W_p \leq 0,109$ кг/кг	$W_p > 0,109$ кг/кг
Меланж	$W_p \leq 0,085$ кг/кг	$0,085$ кг/кг $\leq W_p \leq 0,163$ кг/кг	$W_p > 0,163$ кг/кг

Таблица 2.20 - Участки изотерм сорбции яичных продуктов по W_p , кг/кг при $T = 333\text{K}$

Продукт	1-ый участок	2-ой участок	3-ий участок
Белок	$W_p \leq 0,09$ кг/кг	$0,09$ кг/кг $\leq W_p \leq 0,324$ кг/кг	$W_p > 0,324$ кг/кг
Желток	$W_p \leq 0,05$ кг/кг	$0,05$ кг/кг $\leq W_p \leq 0,101$ кг/кг	$W_p > 0,101$ кг/кг
Меланж	$W_p \leq 0,085$ кг/кг	$0,085$ кг/кг $\leq W_p \leq 0,151$ кг/кг	$W_p > 0,151$ кг/кг

1-ые участки изотерм соответствуют образованию слоя мономолекулярной адсорбции. При поляризации последующих слоев предыдущими молекулы воды продолжают находиться в ориентированном состоянии [9,85]. На 2-ых участках (рисунках 2.28 – 2.30) изотермы обращены выпуклостью к оси относительной влажности воздуха, что типично для полимолекулярной адсорбции и поглощение жидкости также сопровождается выделением тепла, однако количество его уменьшается по мере увеличения влагосодержания и свидетельствует о снижении физико-химической связи молекул воды с адсорбентом и постепенном приближении к свойствам обычной (свободной) жидкости. Для 3-их участков изотерм типично присутствие воды в объеме микро- и макрокапилляров, пор за счет эффекта смачивания без выделения тепла.

По результатам анализа процесса сорбции паров воды яичными продуктами целесообразно рекомендовать влажность $W_p = 0,09$ кг/кг – белок, $W_p = 0,05$ кг/кг – желток и $W_p = 0,085$ – меланж, в качестве конечной при сушке (мономолекулярный адсорбционный слой) для последующего длительного хранения, что соответствует ГОСТ Р 53155-2008 «Продукты яичные жидкие и сухие пищевые. Технические условия» [85].

Результаты исследований показывают, что порошки распылительной сушки белка, желтка и меланжа относятся к порошкам с достаточно большой степенью

гигроскопичности. Следовательно, рационально дальнейшие технологические операции по переработке, дозированию, фасовке, упаковыванию и др. выполнять с учетом относительной влажности воздуха в рабочих зонах. Длительное хранение сухой продукции следует выполнять в герметичной упаковке и/или в складских помещениях при поддержании надлежащей влажности воздуха.

Для математического описания процесса сорбции паров влаги яичными продуктами на основе экспериментальных данных были получены аппроксимирующие функциональные зависимости относительной влажности воздуха от W_p , кг/кг и T , К:

$$\varphi(W_p, T) = (a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h) \quad (2.32),$$

где a, b, c, d, e, f, g, h – эмпирические коэффициенты (табл. 2.21).

Достоверность аппроксимации – $R^2=0,999$.

Таблица 2.21 - Значения эмпирических коэффициентов функциональных зависимостей относительной влажности воздуха от равновесной влажности яичных продуктов и температуры

Продукт Коэффици- циент	Белок	Желток	Меланж
a	0,0009349	-0,0884229	1,4906758
b	-5,9701747	10,1736787	-442,0545575
c	0,0047747	0,0886675	-0,2663733
d	4,8297758	-2,1566524	95,5221898
e	0,0031918	0,0039533	0,0189544
f	-0,0945955	3,8356502	-3,2470631
g	-0,0000089	0,0000255	-0,0001196
h	0,0060967	-0,0031964	0,0407289

Зависимость 2.32 может быть использована в инженерной практике, а также для анализа процессов внутреннего массопереноса при обезвоживании яичных

продуктов.

2.3 Термодинамический анализ внутреннего массопереноса при взаимодействии яичных продуктов с водой

В основополагающих работах по теории сушки [44,85,96 и др.] обоснованы перспективы термодинамического подхода, базирующегося на известных законах классической термодинамики, для анализа и описания процессов массопереноса в объектах обезвоживания. Для изучения процессов переноса энергии или вещества введено понятие потенциала массопереноса (влажнопереноса) Θ [44,85,96 и др.].

Химический потенциал μ является потенциалом переноса парообразной влаги во влажном воздухе, и считается для влажных материалов в области гигроскопического состояния приближенно равным по абсолютной величине потенциалу влажнопереноса [44,85,96 и др.]:

$$|\Theta| = |\mu| = R \cdot T \cdot \ln \varphi \quad (2.33),$$

где $R = 8,314$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

В гигроскопической области химический потенциал μ можно представить функцией влажности W_p и температуры T продукта ($\mu = f(W_p, T)$). Движущей силой сорбции является разность химических потенциалов $\Delta\mu$ свободной μ_0 и связанной воды μ [44,85,96 и др.].

В работах А.В. Лыкова и Л.М. Никитиной [44,85,96 и др.] обосновано, что в гигроскопической области для материала $\Delta\mu$ по абсолютной величине будет равна энергии связи влаги E , то есть фактически изменению свободной энергии Гельмгольца:

$$|\Delta\mu| = E = - \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right) = -RT \ln \varphi \quad (2.34).$$

Таким образом, E можно считать потенциалом влажнопереноса.

Зная общую зависимость (2.32) описывающую сорбционное равновесие яичных продуктов и влажного воздуха, а также численные значения эмпирических коэффициентов (таблица 2.21) можно определить числовые значения энергии связи E :

$$E = -\Delta\mu = -R \cdot T \cdot \ln\left(\left(a \cdot T + b\right) \cdot W_p^3 + \left(c \cdot T + d\right) \cdot W_p^2 + \left(e \cdot T + f\right) \cdot W_p + \left(g \cdot T + h\right)\right) \quad (2.35).$$

Определим изменение свободной энергии путем дифференцирования известного уравнения Гиббса-Гельмгольца по W_p ($P, T = \text{const}$) [11]: $\Delta F = \Delta E - T \cdot \Delta S$, где $T \cdot \Delta S$ – изменение связанной энергии; ΔS – изменение энтропии.

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}\right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P} \quad (2.36).$$

При дифференцировании выражения (2.36) по T получаем:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}\right)_{T,P} = - \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P}.$$

С учетом выражения (2.33), имеем зависимость для дифференциального изменения энтропии связанной воды:

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P} = - \frac{\partial(R \cdot T \cdot \ln \varphi)}{\partial T} \quad (2.37).$$

Таким образом, зная зависимость $\varphi(W_p, T)$ для белка, желтка и меланжа можно определить численные значения свободной энергии, связанной энергии и внутренней энергии (теплового эффекта) процесса сорбции.

Зависимость дифференциального изменения свободной энергии имеет вид:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}\right)_{T,P} = T \cdot R \cdot \ln\left(\left(a \cdot T + b\right) \cdot W_p^3 + \left(c \cdot T + d\right) \cdot W_p^2 + \left(e \cdot T + f\right) \cdot W_p + \left(g \cdot T + h\right)\right) \quad (2.38).$$

Зависимость дифференциального изменения связанной энергии имеет вид:

$$T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P} = -T \cdot R \cdot \left[\frac{\ln\left(\left(a \cdot T + b\right) \cdot W_p^3 + \left(c \cdot T + d\right) \cdot W_p^2 + \left(e \cdot T + f\right) \cdot W_p + \left(g \cdot T + h\right)\right) + \left(a \cdot W_p^3 + c \cdot W_p^2 + e \cdot W_p + g\right)}{\left(\left(a \cdot T + b\right) \cdot W_p^3 + \left(c \cdot T + d\right) \cdot W_p^2 + \left(e \cdot T + f\right) \cdot W_p + \left(g \cdot T + h\right)\right)} \right] \quad (2.39).$$

Зависимость дифференциального изменения теплового эффекта сорбции имеет вид:

$$\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}\right)_{T,P} + T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P} =$$

$$= T \cdot R \cdot \ln\left((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)\right) +$$

$$+ \left[-T \cdot R \cdot \left[\ln\left((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)\right) + \right. \right. \quad (2.40).$$

$$\left. \left. + T \cdot \frac{(a \cdot W_p^3 + c \cdot W_p^2 + e \cdot W_p + g)}{\left((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)\right)} \right] \right]$$

В графическом виде на рисунке 2.31 для белка, рисунке 2.32 для желтка и рисунке 2.33 для меланжа представлены зависимости дифференциального изменения свободной энергии, связанной энергии и теплового эффекта сорбции от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды яичными продуктами.

Отрицательное значение дифференциального изменения свободной энергии во всем диапазоне влажности (рисунок 2.31 – 2.33), указывает на высокую степень гигроскопичности яичных продуктов. Изменения энтропийной составляющей (рисунок 2.31 – 2.33) в диапазоне изменения влажности обусловлены стремлением системы к термодинамическому равновесию.

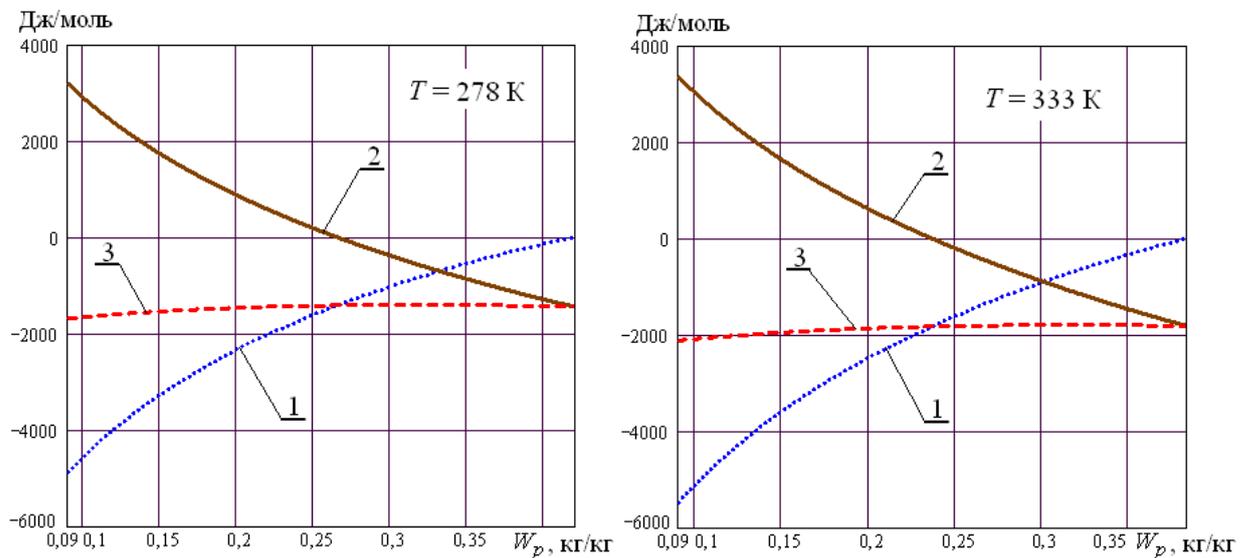


Рисунок 2.31 - Зависимости дифференциального изменения свободной энергии (1), связанной энергии (2) и теплового эффекта (3) сорбции от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды белком

Дифференциальное изменение внутренней энергии в диапазоне влажности отрицательно, т.е. присутствуют тепловые эффекты (рисунок 2.31 – 2.33) при

сорбции паров воды яичными продуктами. В целом характер зависимостей дифференциальных изменений свободной энергии, связанной энергии и теплового эффекта сорбции типичен для большинства биополимерных систем [9, 11 др.].

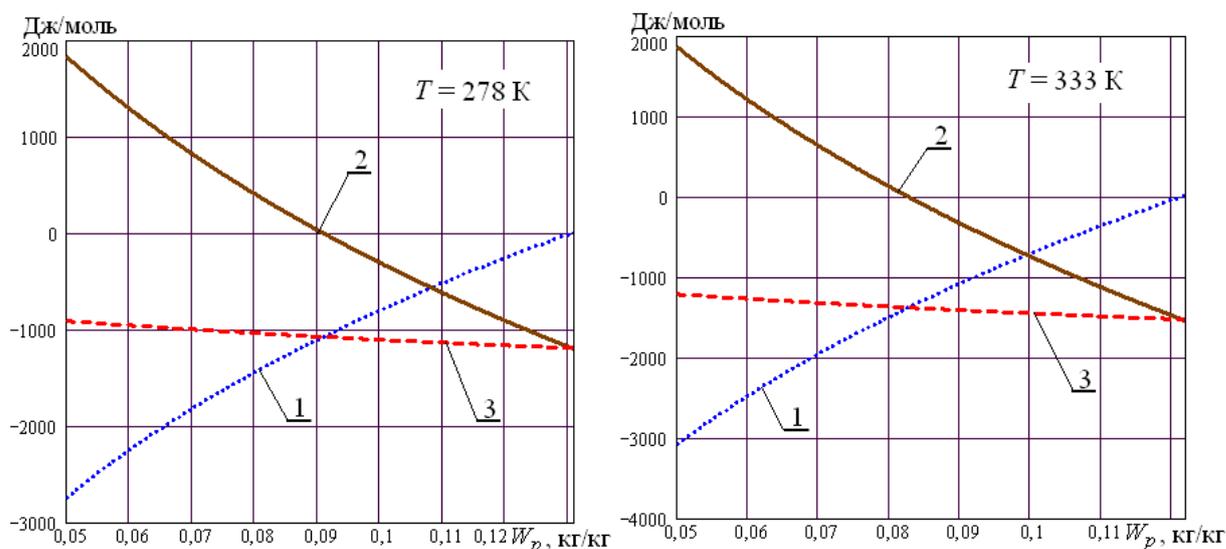


Рисунок 2.32 - Зависимости дифференциального изменения свободной энергии (1), связанной энергии (2) и теплового эффекта (3) сорбции от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды желтком

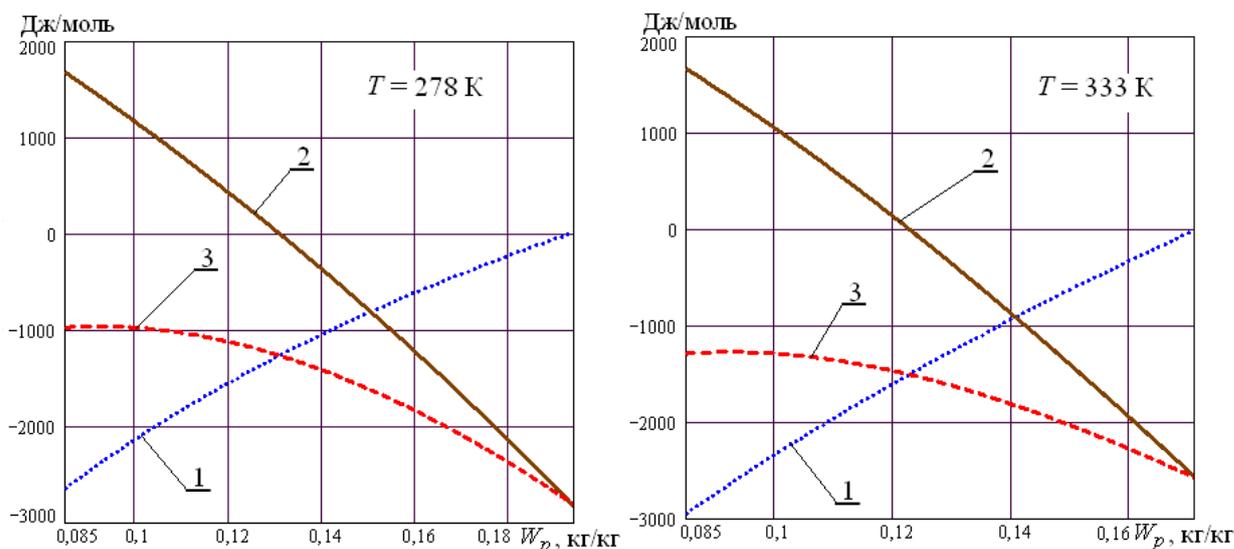


Рисунок 2.33 - Зависимости дифференциального изменения свободной энергии (1), связанной энергии (2) и теплового эффекта (3) сорбции от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды меланжем

При удалении связанной с материалом влаги тепловая энергия испарения r , входящая в дифференциальное уравнение теплопереноса [85], может быть представлена как сумма теплоты смачивания $r_{см}$ и теплоты парообразования

свободной воды r' . При этом $r_{см}$ определяется дифференциальным изменением свободной энергии изотермического обезвоживания. Количество тепловой энергии, требуемое для испарения 1кг воды из материала, согласно [9,11], с учетом энтропийной составляющей устанавливается по формуле, Дж/кг:

$$r = r' + r_{см} + r_{энт} = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T - 55,(5) \cdot R \cdot T \cdot \ln \varphi + 55,(5) \cdot T \cdot \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \quad (2.41).$$

С учетом выражений (2.38) и (2.39), получаем зависимость вида $r = f(W_p, T)$, Дж/кг:

$$\begin{aligned} r = & 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T - \\ & - 55,(5) \cdot (R \cdot T \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h))) + \\ & + 55,(5) \cdot \left(-T \cdot R \cdot \left[\ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)) + \right. \right. \\ & \left. \left. + T \cdot \frac{(a \cdot W_p^3 + c \cdot W_p^2 + e \cdot W_p + g)}{((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h))} \right] \right) \end{aligned} \quad (2.42).$$

Для анализа движущих сил в процессе сорбции с целью выбора оптимальных режимов энергоподвода получим функциональную зависимость термоградиентного коэффициента массопереноса от влажности W_p и температуры T . Термоградиентный коэффициент δ_p , введенный в теорию А.В. Лыковым [85] является составляющей относительного коэффициента термодиффузии δ . При гигротермическом равновесии δ_p , является термодинамической характеристикой и равен δ . Согласно [85]:

$$\delta_p = c_m \cdot \left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{W_p=const} \quad (2.43),$$

где $c_m = \left(\frac{\partial W_p}{\partial \Delta \mu} \right)_{T=const}$ – удельная изотермическая влагоемкость материала.

Таким образом,

$$\delta_p = \left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{W_p} \cdot \left(\frac{\partial W_p}{\partial \Delta \mu} \right)_T \quad (2.44).$$

Учитывая (2.33), получим:

$$\left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{W_p} = \left(\frac{\partial (RT \ln \varphi)}{\partial T} \right) \quad (2.45).$$

Причем выражение является дифференциальным изменением энтропии сорбции и называется температурным коэффициентом.

Следовательно:

$$\left(\frac{\partial W_p}{\partial \Delta\mu}\right)_T = \frac{1}{\left(\frac{\partial \Delta\mu}{\partial W_p}\right)_T}, \quad (2.46)$$

С учетом выражения (2.33) и (2.45) получим:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \Delta\mu}{\partial T}\right)_{W_p} &= \frac{\partial(T \cdot R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)))}{\partial T} = \\ &= R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)) + \\ &+ R \cdot T \cdot \frac{(a \cdot W_p^3 + c \cdot W_p^2 + e \cdot W_p + g)}{((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h))} \end{aligned} \quad (2.47).$$

Из выражения (2.33) с учетом (2.46) получим:

$$\left(\frac{\partial W_p}{\partial \Delta\mu}\right)_T = \frac{1}{\left(-T \cdot R \cdot \frac{(3 \cdot (a \cdot T + b) \cdot W_p^2 + 2 \cdot (c \cdot T + d) \cdot W_p + (e \cdot T + f))}{((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h))}\right)} \quad (2.48)$$

Таким образом, подставляя в (2.44) выражения (2.47) и (2.48), с учетом выражения (2.33) для белка, желтка и меланжа получим функциональные зависимости термоградиентного коэффициента δ_p от влажности W_p для яичных продуктов (рисунок 2.34 – 2.36).

Характер изменения термоградиентного коэффициента от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды яичными продуктами типичен для большинства биополимерных систем [85]. Термоградиентный коэффициент увеличивается с повышением влажности, достигая своего максимума (рисунок 2.34 – 2.36).

Максимум функции $\delta_p = f(W_p)$ соответствует границе между коллоидно-связанной и «свободной» влагой (макро- и микрокапилляров, пор, осмотической) [85]. До максимального значения функции $\delta_p = f(W_p)$ монотонно возрастает (рисунок 2.34 – 2.36), что указывает на перемещение влаги прежде всего в виде пара.

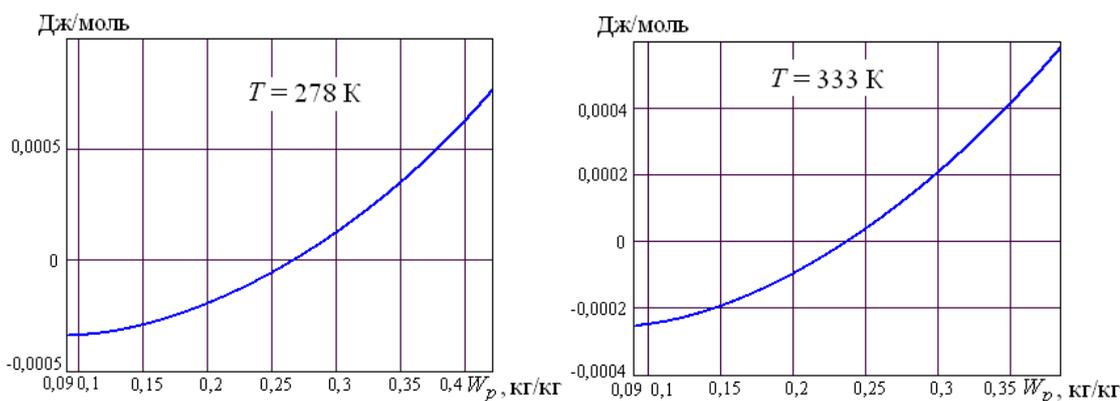


Рисунок 2.34 - Зависимости термодифференциального коэффициента от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды белком

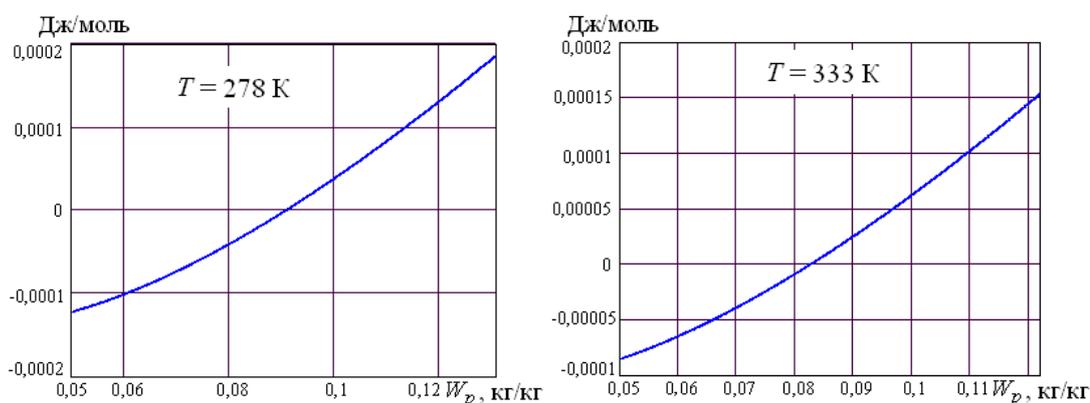


Рисунок 2.35 - Зависимости термодифференциального коэффициента от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды желтком

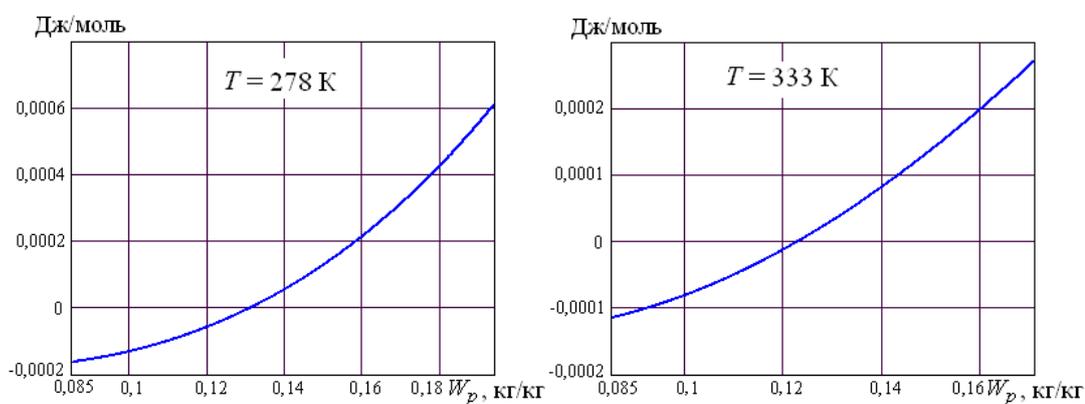


Рисунок 2.36 - Зависимости термодифференциального коэффициента от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды меланжем

Изменение энергий связи воды с исследуемыми материалами и характер перемещения влаги в продуктах типичны для пищевых биополимеров. Для интенсификации/рационализации сушки яичных продуктов целесообразно повышение поверхности массообмена диспергированием продукта (распыление, кипящий слой) и использование объемных вариантов энергоподвода.

ГЛАВА 3. МЕХАНИЗМ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКЕ ЯИЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Для физико-математического моделирования тепломассообмена и анализа механизма влагоудаления при сушке яичных продуктов в распыленном состоянии очевидна необходимость выявления закономерностей изменения во времени комплекса основных параметров, характеризующих высушиваемый продукт. К анализируемым параметрам продукта относятся: температура, влажность, плотность, дисперсность и др. Данные параметры обуславливают не только характер и скорость тепломассообменных процессов, но и влияют на характеристики и гидродинамику взаимодействия сушильного агента и частиц.

Экспериментально–аналитическое исследование кинетики процесса распылительной сушки яичных продуктов проводилось для эмпирического подтверждения ряда положений теории сушки, анализа тепломассообменных процессов и разработки математической модели массопереноса в распыленной частице.

В качестве объектов сушки использовались:

- 1) Яичный белок с начальной влажностью $W_H = 0,882$ кг/кг.
- 2) Яичный желток с начальной влажностью $W_H = 0,54$ кг/кг.
- 3) Яичный меланж с начальной влажностью $W_H = 0,75$ кг/кг.

Приготовление экспериментальных образцов осуществлялось на технологической установке приготовления эмульсий и суспензий модели УПЭС 0,15/3,0 (производитель – ООО «Инновационно - техническое предприятие «ПРОМБИОФИТ», г. Москва) в производственном помещении ООО «КАСПРОФИТ» в соответствии с традиционной технологией [18,19,75,93,139,141]. Исследование процессов сушки выполнялось с использованием экспериментальных установок кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет».

Конечная влажность продуктов W_k , кг/кг принята в соответствии с требованиями к физико-химическим показателям сухих яичных продуктов, регламентированных в ГОСТ Р 53155-2008 «Продукты яичные жидкие и сухие

пищевые. Технические условия» и подтверждена при изучении гигроскопических характеристик объекта исследования:

- 1) Сухой яичный белок с влажностью $W_k = 0,09$ кг/кг.
- 2) Сухой яичный желток с влажностью $W_k = 0,05$ кг/кг.
- 3) Сухой меланж (яичный порошок) с влажностью $W_k = 0,085$ кг/кг.

3.1 Экспериментальное исследование процесса распылительной сушки яичных продуктов

Для изучения кинетики распылительной сушки яичных продуктов использовалась экспериментальная установка, разработанная на кафедре «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет» (рисунки 3.1 и 3.2). В ходе экспериментов производился отбор проб капель продукта из зоны сушки путем их улавливания на поверхность гидрофобного материала, далее осуществлялась досушка проб на аналитических весах.



Рисунок 3.1 - Экспериментальная установка для исследования процессов распылительной сушки

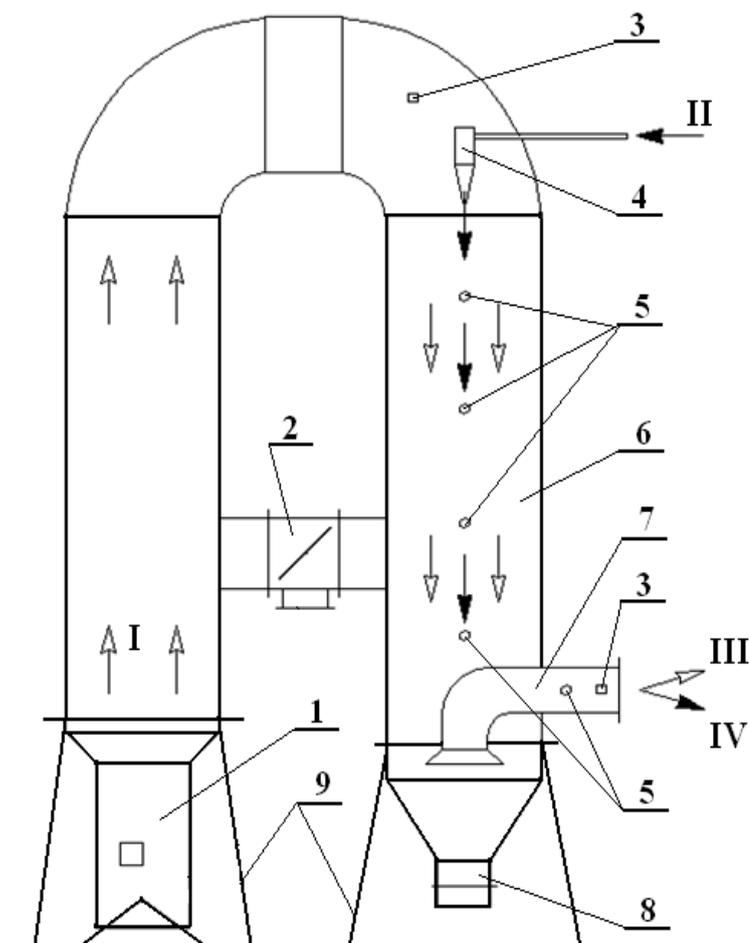


Рисунок 3.2 - Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования процессов распылительной сушки:

1 – электрокалорифер СФО-20/10 УХЛЗ; 2 – байпас с запорной/регулирующей дроссельной заслонкой; 3 – термопара; 4 – форсунка; 5 – штуцеры для отбора проб продукта; 6 – сушильная камера; 7 – трубопровод для отвода продукта и сушильного агента из зоны сушки; 8 – сборник продукта; 9 – опоры.

Потоки: I – сушильный агент; II – исходный продукт на распыление; III – отработавший сушильный агент в циклон; IV – сухой продукт в циклон.

Экспериментальная установка (рисунок 3.1) оснащена электрокалорифером СФО-20/10 УХЛЗ 1 и байпасным трубопроводом 2, что позволяет осуществлять регулировку расхода сушильного агента IV (максимально $Q_{c.a.} = 1200\text{м}^3/\text{ч}$) при различных температурах (максимально $T_{c.a.} = 260^\circ\text{C}$) в сушильной камере 6. Температура сушильного агента определялась на входе и выходе рабочей камеры при помощи хромель-копелевых термопар 3 ХК(L) ТП-011 (номинальные

статические характеристики прибора по ГОСТ Р 8.585-2001, допускаемая основная погрешность – не более 0,5 К), подключаемых к мультиметрам.

Исходный продукт I (рисунок 3.1) при сушке распылялся в сушильную камеру форсункой 4. Для распыления продуктов в рабочий объем сушильной камеры использовалась акустическая форсунка с газоструйным излучателем Гартмана (рисунок 3.3, а), которая обеспечивала надежное распыление, при среднем характерном размере распыленных частиц капель 20-30мкм. Форсунка с газоструйным излучателем Гартмана характеризуется широким диапазоном регулирования производительности, высокими интенсивностью акустических колебаний и к.п.д. генератора, простотой конструкции и надежностью в эксплуатации.



(а)



(б)

Рисунок 3.3 - Акустическая форсунка с газоструйным излучателем Гартмана (а) и поршневой компрессор (б).

Для подачи распыливающего агента – воздуха, регулировки его давления и расхода использовался поршневой компрессор Atmos Bobby 4/46 с однофазным электродвигателем (рисунок 3.3, б).

Технические характеристики компрессора Atmos Bobby 4/46 и параметры рабочего режима для распыления представлены в таблице 3.1. Параметры рабочего

режима распыления (таблица 3.1) и характеристики факела распыла (таблица 3.2) установлены в ходе комплекса предварительных экспериментов.

Таблица 3.1 - Технические характеристики компрессора и параметры рабочего режима распыления исследуемых продуктов.

Технические характеристики компрессора	
Объем ресивера, л	46
Мощность двигателя, кВт	4
Напряжение, В	220
Всасываемое количество воздуха, л/мин	550
Максимальное давление воздуха, бар	8
Номинальные обороты, об./мин	2850
Габаритные размеры, мм	700x410x660
Масса, кг	46
Рабочий режим распыления	
Давление воздуха, бар	3-6
Расход продуктов на распыление G_{WH} , кг/ч	
1) Яичный белок с начальной влажностью $W_H = 0,882$ кг/кг.	15
2) Яичный желток с начальной влажностью $W_H = 0,54$ кг/кг.	6
3) Яичный меланж с начальной влажностью $W_H = 0,75$ кг/кг.	12
Расстояние от сопловых отверстий форсунки до резонатора, мм	2 – 6

Постановочные эксперименты проводились с целью определения устойчивого режима распыления для исключения/уменьшения налипания капель продуктов на внутреннюю поверхность сушильной камеры.

Таблица 3.2 - Характеристики факела распыла исследуемых продуктов

Корневой угол, град	120 – 135
Дальнобойность, м	0,3 – 0,65
Средний характерный размер распыленных частиц, мкм	20 – 30

Время пребывания витающих частиц продуктов в сушильной камере устанавливалось в ходе предварительных экспериментов при различных расходах сушильного агента. Внизу сушильной камеры через трубопровод 7 потоки направлялись в циклон для разделения на поток отработавшего сушильного агента

III и готовый сухой порошок продукта IV. Часть высохших частиц продукта большей массы собирались в сборнике 8.

В качестве основных факторов, влияющих на эффективность процесса сушки при проведении экспериментальных исследований с учетом [7,53,54,88,89,120] были приняты: температура сушильного агента $T_{с.а.}$, К и начальная температура продукта $T_{прод}$, К. Границы варьирования факторов (таблица 3.3) установлены из технологических ограничений и возможностей технической реализации экспериментального процесса сушки. Верхний предел $T_{прод} = 298\text{K}$ соответствует температуре в производственных помещениях. Нижний предел $T = 278\text{K}$, соответствует температуре хранения жидких яичных продуктов и принят на основании результатов анализа технологии сухих яичных продуктов [18,19,75,93,139,141]. Остальные факторы приняты постоянными и установлены в результате аналитических расчетов и серии постановочных экспериментов.

Таблица 3.3 - Факторы и уровни их варьирования

Факторы Уровни	$T_{с.а.}$, К	$T_{прод}$, К
1	423	278
2	448	298
3	473	-

Экспериментальные исследования кинетики сушки проводились по полному многоуровневому многофакторному плану с помощью вероятностно-статистических методов планирования и обработки экспериментальных данных.

Непрерывный процесс сушки производился при прямоточном контакте распыленного продукта с нагретым воздухом, при этом в установившемся режиме сушки осуществлялся отбор проб витающих частиц продукта по высоте камеры 6 через штуцеры 5 (рисунок 3.2). Пробы продукта отбирались с целью определения степени их обезвоживания на разных стадиях процесса и построения экспериментальных кривых сушки. Пробоотборник, представляет собой отрезок металлического прута с пазом (рисунок 3.4). В паз пробоотборника устанавливался предварительно взвешенный гидрофобный материал – микрофибра, на который улавливались частицы продукта.

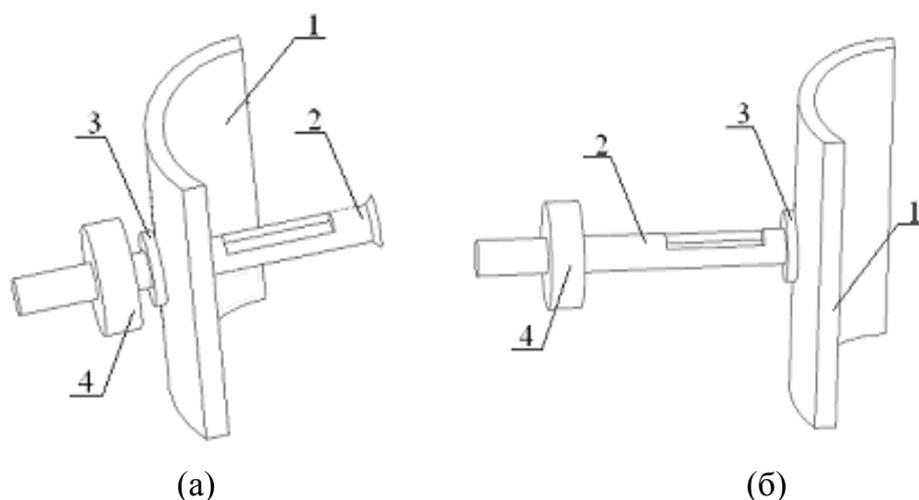


Рисунок 3.4 - Схема загрузки (а) и разгрузки (б) пробоотборника:

1 – стенка сушильной камеры; 2 – пробоотборник; 3 – штуцер; 4 – предохранитель.

При разгрузке (рисунок 3.4) материал извлекался из пробоотборника и взвешивался на аналитических весах. Далее проба высушивалась в вакууме при инфракрасном энергоподводе до достижения постоянного веса, соответствующего W_k . Рассчитывалась текущая влажность продукта в точках отбора проб по высоте камеры и, соответственно, в течение времени процесса (Приложение 1).

Вычисление погрешностей при определении влажности продукта выполнялось в вышеуказанной последовательности (формулы (2.2) – (2.6)). Результаты исследований представлены в таблице Приложение 1, где: W_1 , W_2 , и W_3 – влажности, определенные при соответственно трех повторениях опыта, кг/кг; W – средняя влажность определенная по формуле (2.2), кг/кг; S_n – среднее квадратичное отклонение при определении W , определенное по формуле (2.3), кг/кг; S_W – среднее квадратичное отклонение среднего при определении W , вычисленное по формуле (2.4), кг/кг; ΔW – погрешность результатов вычисленная по формуле (2.5), кг/кг; ε_W – относительная погрешность по формуле (2.6). Относительная ошибка при определении влажности продукта W не превышала $\varepsilon_W = 15\%$.

3.2 Исследование кинетики распылительной сушки яичных продуктов

На основе результатов экспериментальных исследований (Приложение 1) построены кривые сушки продуктов (рисунок 3.5 – 3.10).

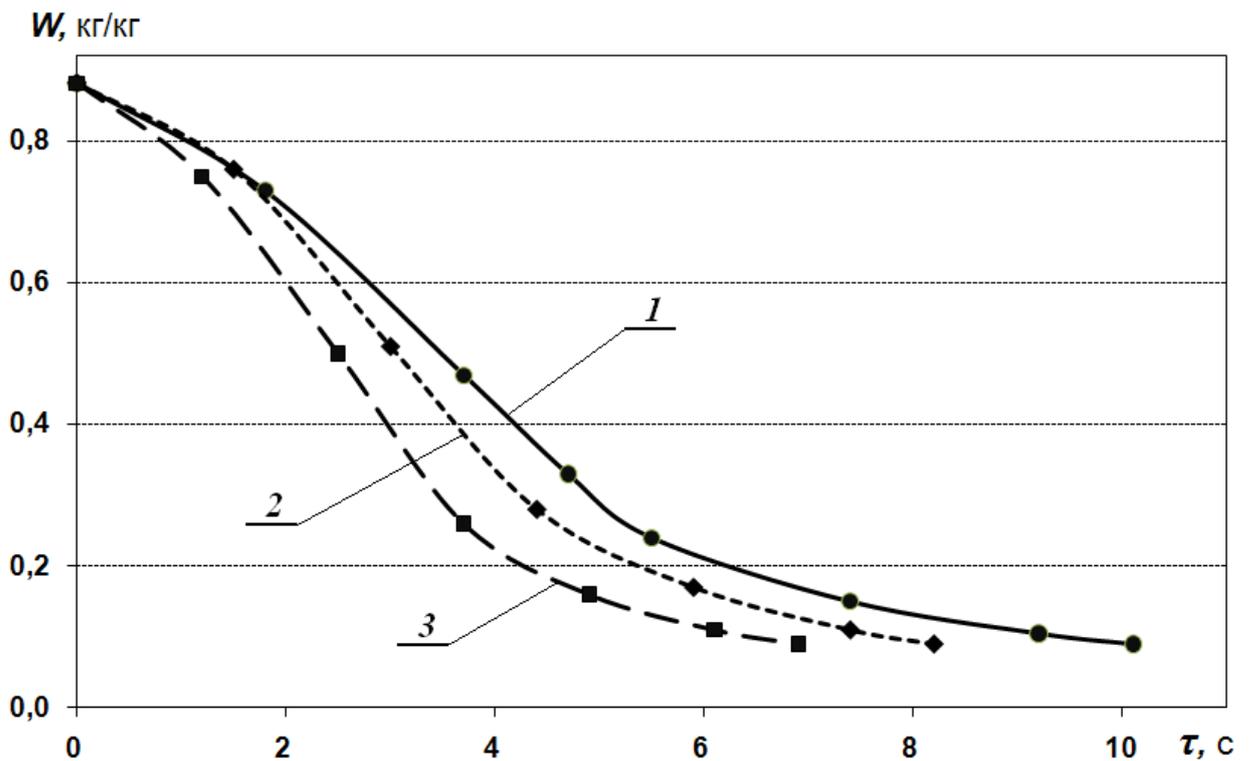


Рисунок 3.5 - Кинетика распылительной сушки яичного белка при $T_{\text{прод}} = 278\text{K}$:

1 – при $T_{\text{с.а.}} = 423\text{K}$; 2 – при $T_{\text{с.а.}} = 448\text{K}$; 3 – при $T_{\text{с.а.}} = 473\text{K}$.

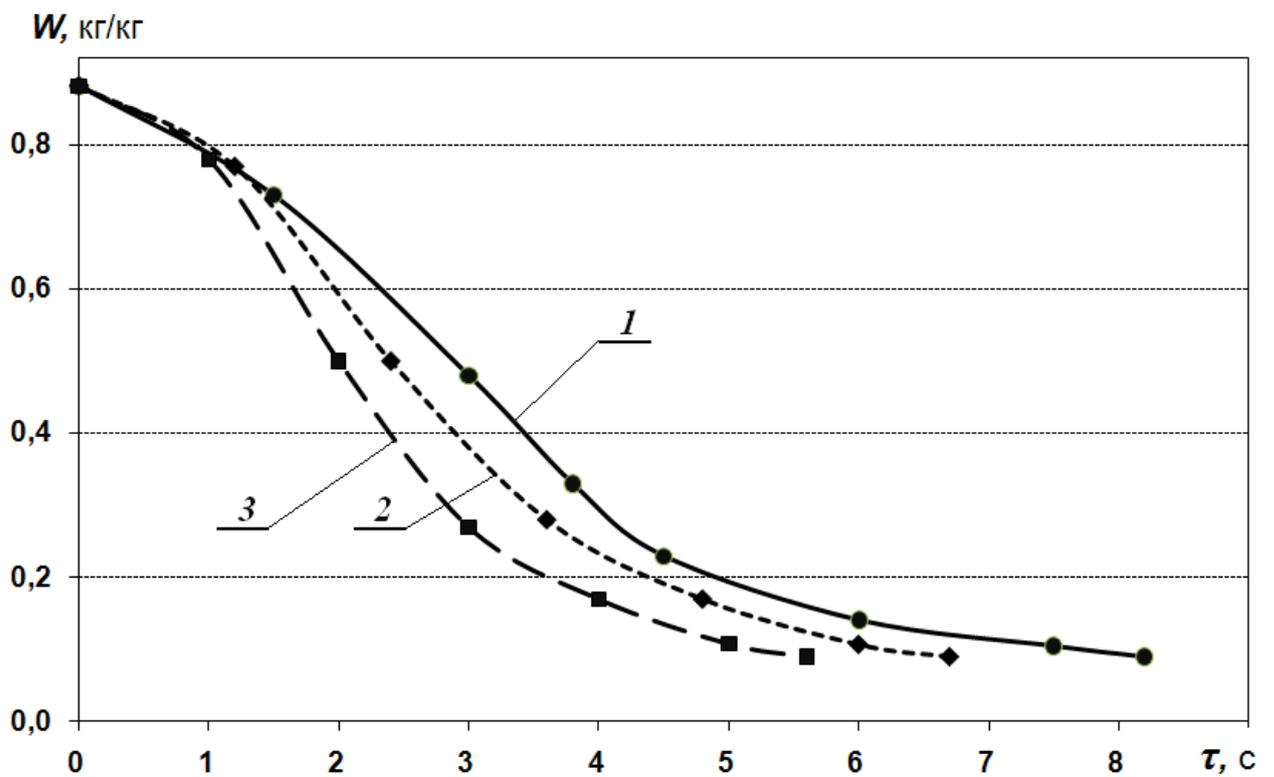


Рисунок 3.6 - Кинетика распылительной сушки яичного белка при $T_{\text{прод}} = 298\text{K}$:

1 – при $T_{\text{с.а.}} = 423\text{K}$; 2 – при $T_{\text{с.а.}} = 448\text{K}$; 3 – при $T_{\text{с.а.}} = 473\text{K}$.

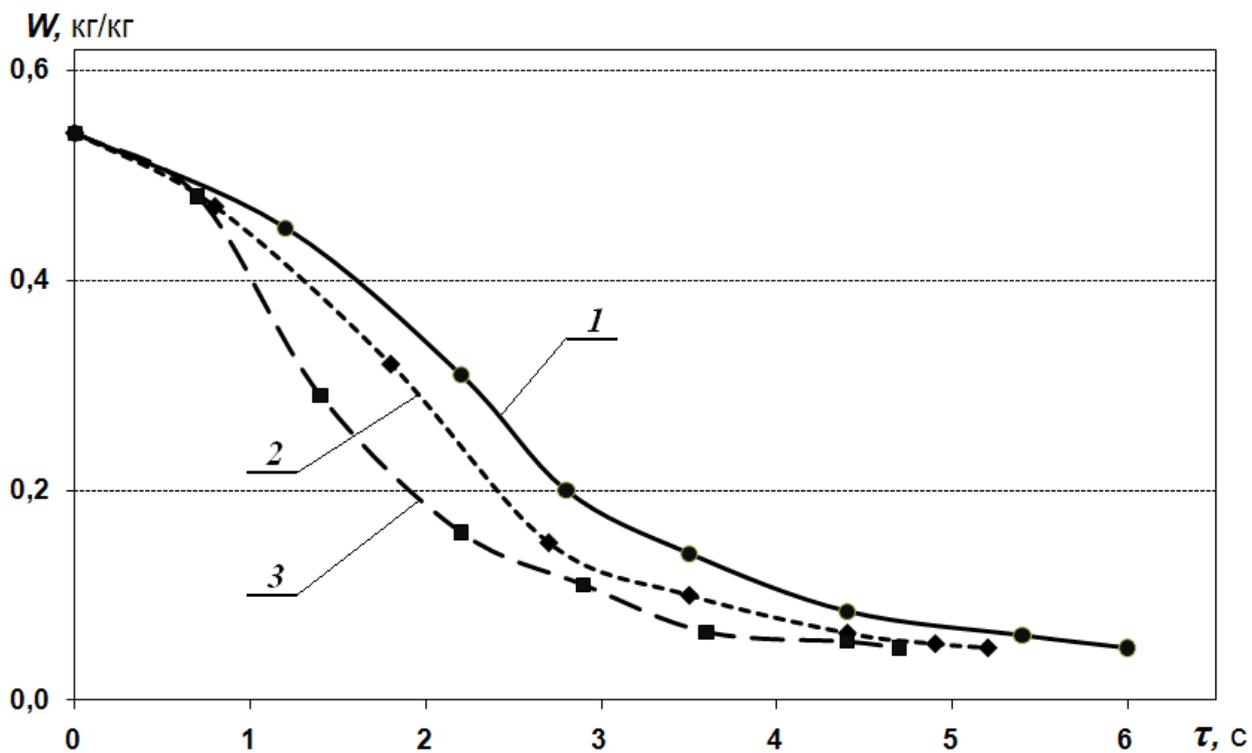


Рисунок 3.7 - Кинетика распылительной сушки яичного желтка при $T_{prod} = 278K$:

1 – при $T_{c.a.} = 423K$; 2 – при $T_{c.a.} = 448K$; 3 – при $T_{c.a.} = 473K$.

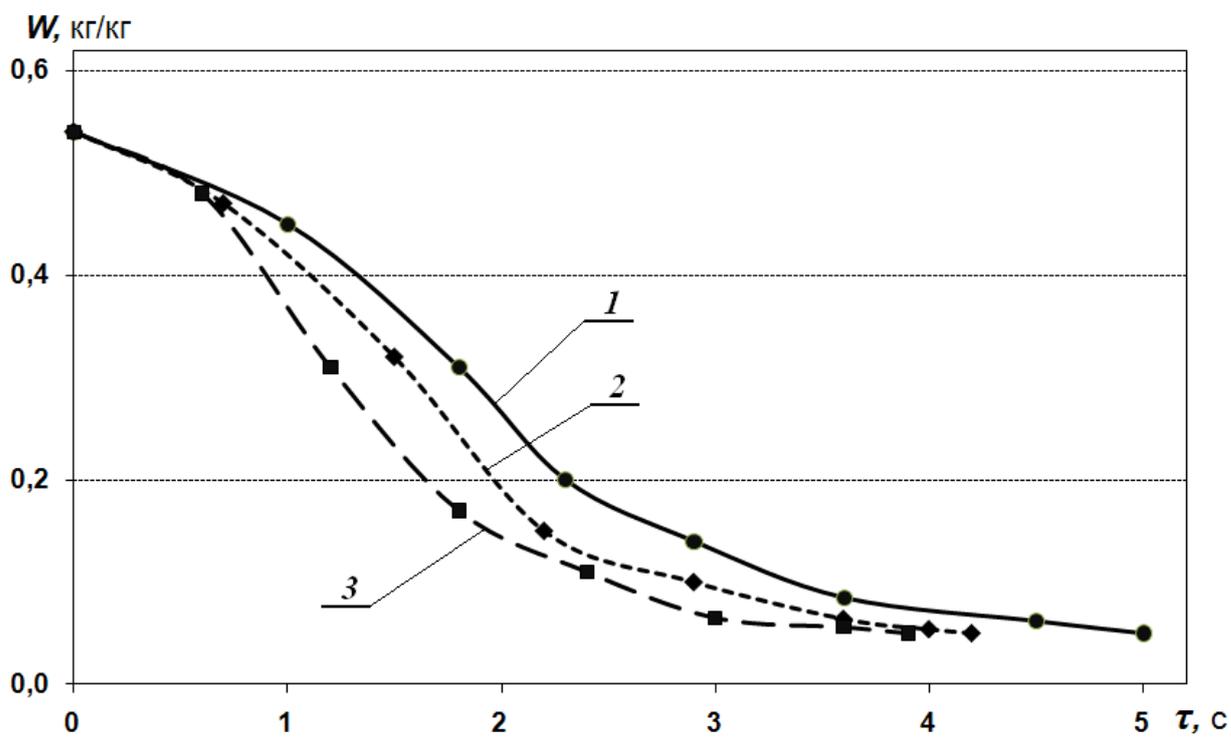


Рисунок 3.8 - Кинетика распылительной сушки яичного желтка при $T_{prod} = 298K$:

1 – при $T_{c.a.} = 423K$; 2 – при $T_{c.a.} = 448K$; 3 – при $T_{c.a.} = 473K$.

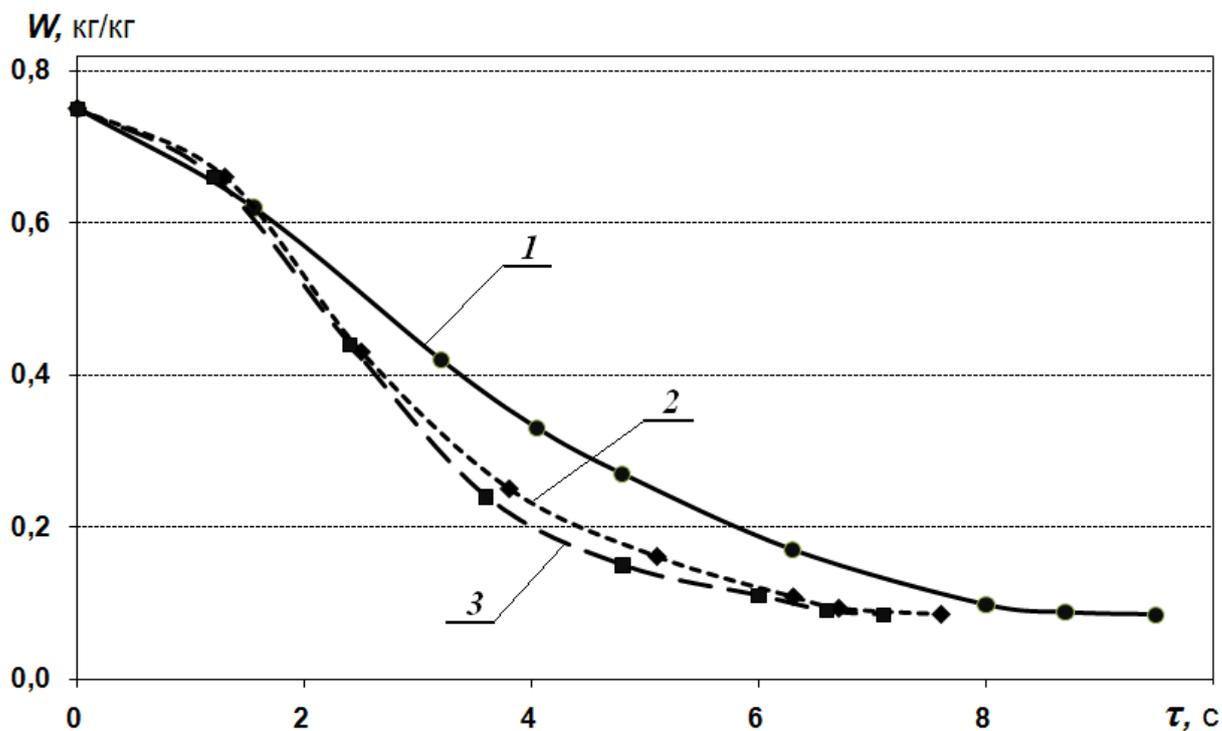


Рисунок 3.9 - Кинетика распылительной сушки яичного меланжа при $T_{prod} = 278K$:
 1 – при $T_{c.a.} = 423K$; 2 – при $T_{c.a.} = 448K$; 3 – при $T_{c.a.} = 473K$.

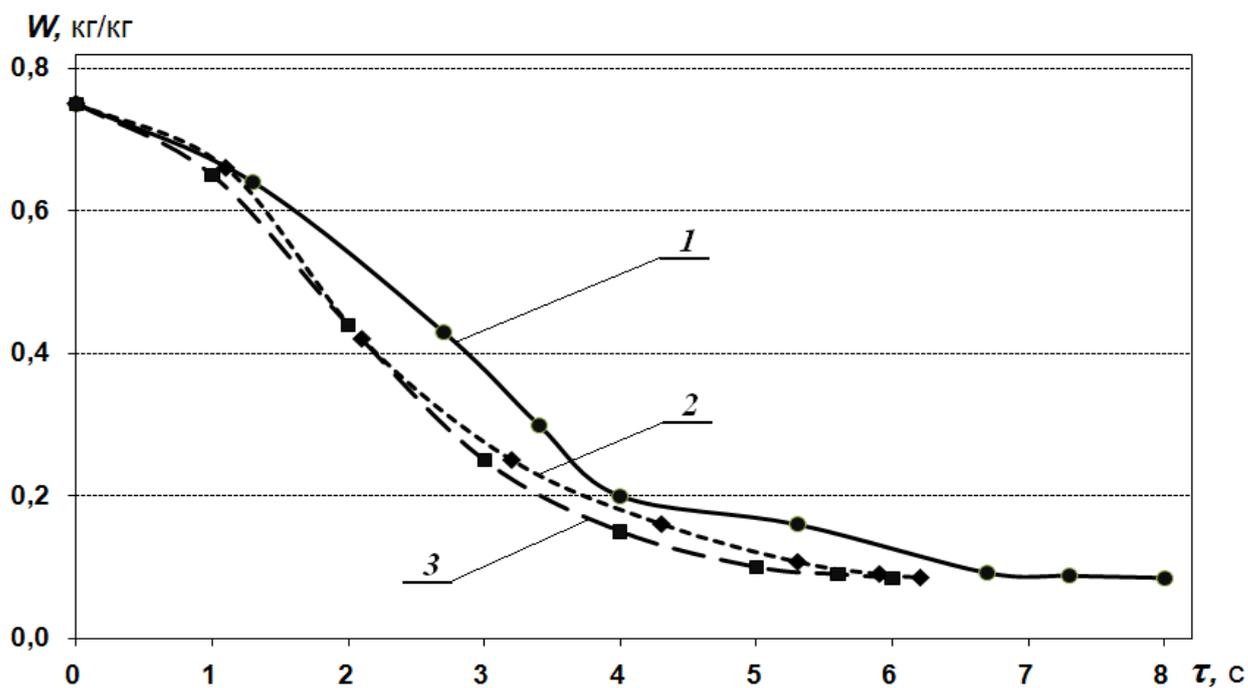


Рисунок 3.10 - Кинетика распылительной сушки яичного меланжа при $T_{prod} = 298K$:
 1 – при $T_{c.a.} = 423K$; 2 – при $T_{c.a.} = 448K$; 3 – при $T_{c.a.} = 473K$.

Полученные экспериментальные кривые сушки необходимы для определения удельной производительности сушилки, моделирования и анализа механизма внутреннего теплопереноса.

С целью получения функциональных зависимостей скорости сушки $dW/d\tau$ или $dc/d\tau$, кг/(кг·с) от влажности W или содержания сухих веществ c , кг/кг ($c = 1 - W$) для яичных продуктов экспериментальные данные (Приложение 1) графически представлены в виде зависимости $\tau(W)$ (пример на рисунке 3.11) и математически описаны полиномиальной зависимостью вида:

$$\tau(W) = a_k \cdot W^4 + b_k \cdot W^3 + c_k \cdot W^2 + d_k \cdot W + e_k, \quad (3.1),$$

где $\tau(W)$ – время сушки, с; a_k, b_k, c_k, d_k, e_k , – эмпирические коэффициенты (таблица 3.4 и 3.5). Величина достоверности аппроксимации составляла не менее $R^2=0,99$.

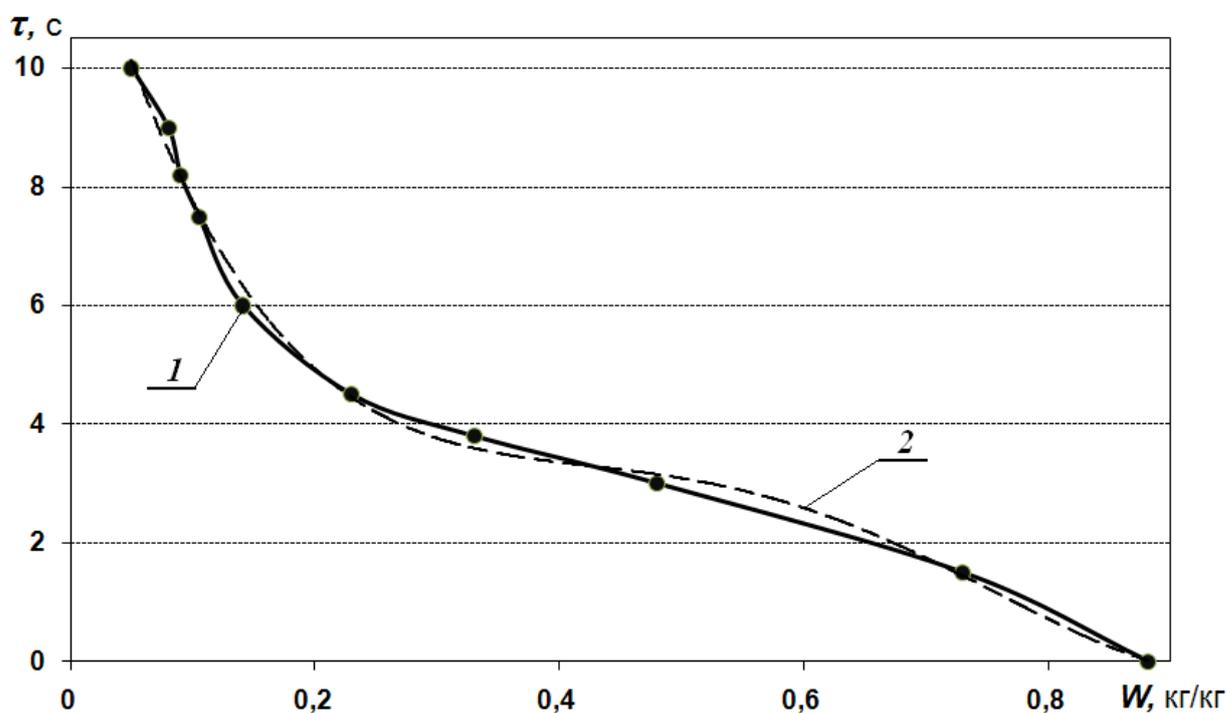


Рисунок 3.11 - Зависимость времени процесса от влажности при распылительной сушке яичного белка (при $T_{\text{прод}} = 298\text{K}$ и $T_{\text{с.а.}} = 423\text{K}$): 1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая функциональная зависимость.

Дифференцированием зависимости (3.1) по W получим:

$$\frac{d\tau}{dW} = 4 \cdot a_k \cdot W^3 + 3 \cdot b_k \cdot W^2 + 2 \cdot c_k \cdot W + d_k, \quad (3.2).$$

Из (3.2) получим зависимость для скорости $dW/d\tau$:

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{1}{4 \cdot a_k \cdot W^3 + 3 \cdot b_k \cdot W^2 + 2 \cdot c_k \cdot W + d_k}, \quad (3.3).$$

Учитывая формулу связи $W = 1 - c$, после математических преобразований выражение функциональной зависимости скорости сушки (3.3) принимает вид:

$$\frac{dc}{d\tau} = \frac{-1}{4 \cdot a_k \cdot (1-c)^3 + 3 \cdot b_k \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot c_k \cdot (1-c) + d_k}, \quad (3.4).$$

Таблица 3.4 - Значения эмпирических коэффициентов функциональных зависимостей времени и скорости процесса сушки при $T_{\text{прод}} = 278\text{K}$

Продукт Коэффициент	Яичный белок	Яичный желток	Яичный меланж
при $T_{c.a.} = 423\text{K}$			
a_k	118,2878	674,6006	212,0435
b_k	-283,3652	-957,9635	-418,1889
c_k	235,0239	466,5027	288,7579
d_k	-86,3286	-97,4125	-90,8790
e_k	16,1672	10,0881	15,1018
при $T_{c.a.} = 448\text{K}$			
a_k	90,4682	441,5547	110,0295
b_k	-226,4244	-660,9224	-261,0994
c_k	194,2845	339,2705	209,3491
d_k	-72,7362	-75,1922	-72,9575
e_k	13,6647	8,2186	12,3426
при $T_{c.a.} = 473\text{K}$			
a_k	98,2458	268,9942	117,8355
b_k	-234,4103	-455,1896	-273,0927
c_k	192,7806	260,3063	214,6228
d_k	-68,5181	-63,5231	-72,8504
e_k	11,8742	7,2259	11,8717

Таблица 3.5 - Значения эмпирических коэффициентов функциональных зависимостей времени и скорости процесса сушки при $T_{\text{прод}} = 298\text{K}$

Продукт Коэффициент	Яичный белок	Яичный желток	Яичный меланж
при $T_{c.a.} = 423\text{K}$			
a_k	108,3142	549,4922	171,1340
b_k	-256,3872	-784,1845	-360,3991
c_k	209,4347	383,9560	262,0008
d_k	-74,7481	-80,6233	-83,2600
e_k	13,3853	8,3611	12,9833
при $T_{c.a.} = 448\text{K}$			
a_k	58,9217	325,0257	56,6810
b_k	-155,7645	-500,0459	-155,3195
c_k	139,9218	262,2213	136,9007
d_k	-54,8659	-59,1956	-52,1202
e_k	10,7978	6,6184	9,7023
при $T_{c.a.} = 473\text{K}$			
a_k	47,2811	250,0615	148,8336
b_k	-129,8487	-406,3594	-310,6071
c_k	119,8176	224,3716	223,8967
d_k	-47,4816	-53,0591	-69,9007
e_k	9,1840	5,9782	10,4692

На рисунках 3.12 – 3.17 представлены кривые скорости сушки для исследуемых продуктов, построенные с использованием функциональной зависимости (3.4).

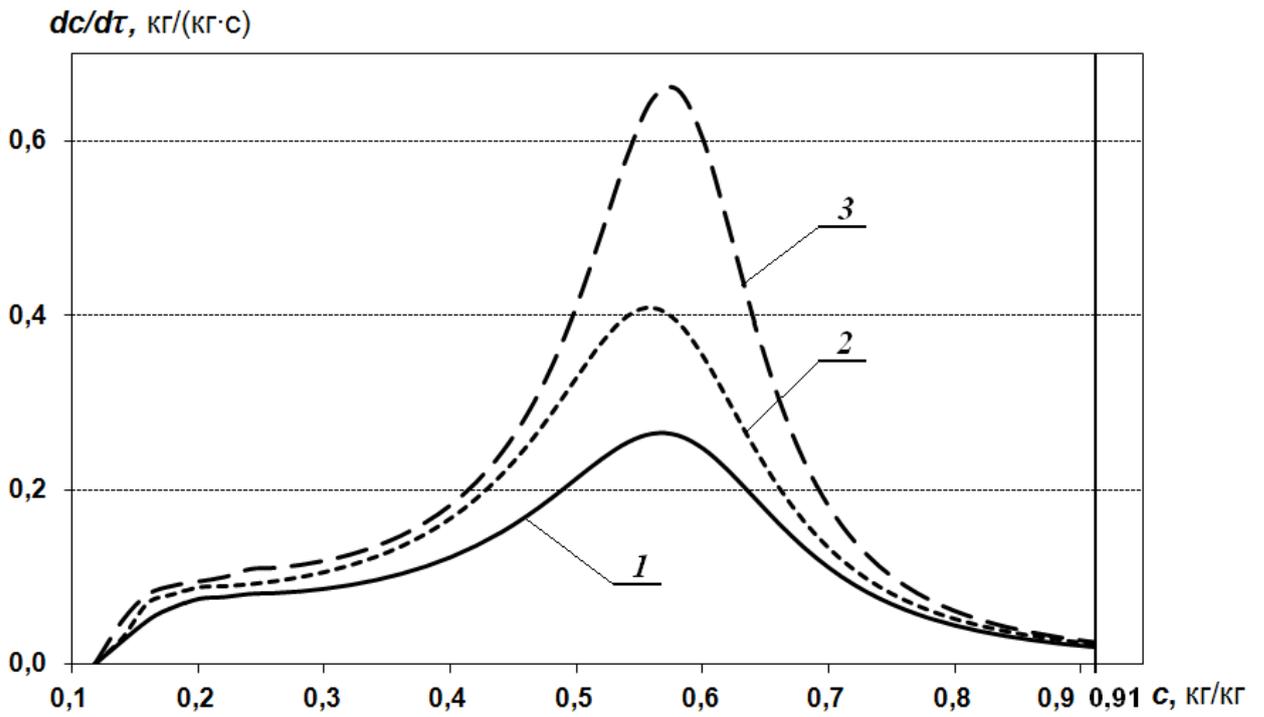


Рисунок 3.12 - Кривые скорости распылительной сушки яичного белка при $T_{prod} = 278\text{K}$:
 1 – при $T_{c.a.} = 423\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 448\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 473\text{K}$.

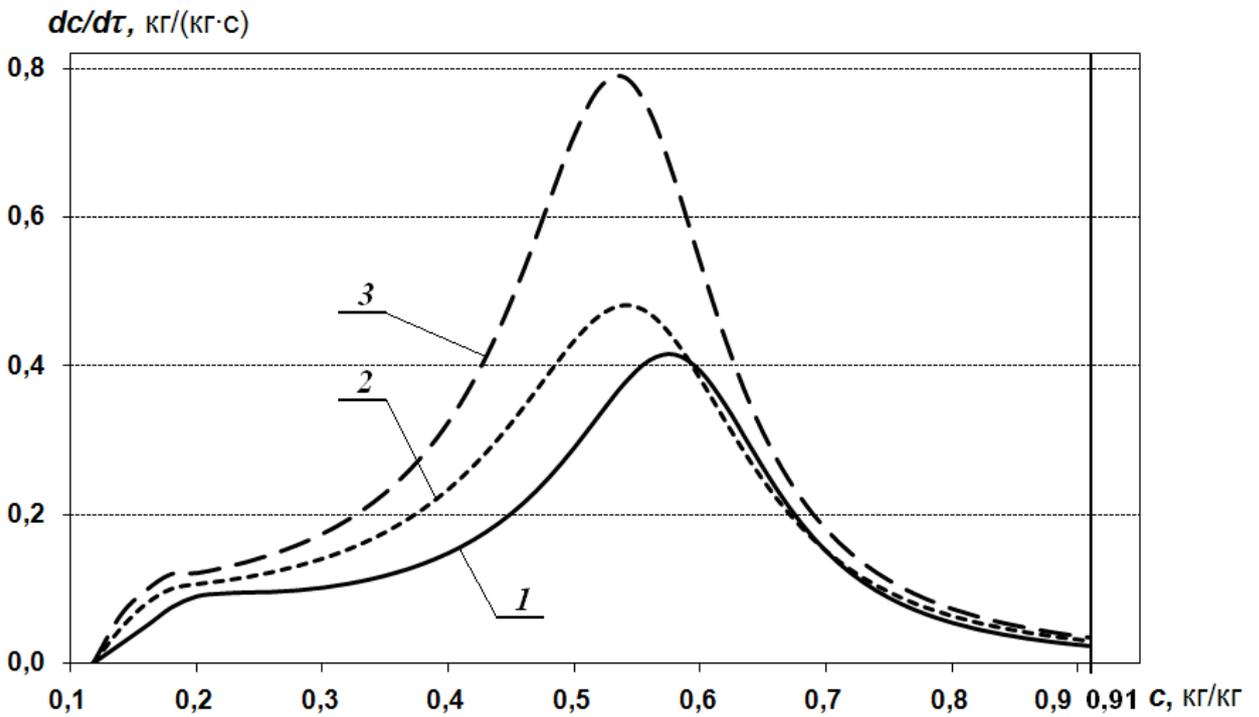


Рисунок 3.13 - Кривые скорости распылительной сушки яичного белка при $T_{prod} = 298\text{K}$:
 1 – при $T_{c.a.} = 423\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 448\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 473\text{K}$.

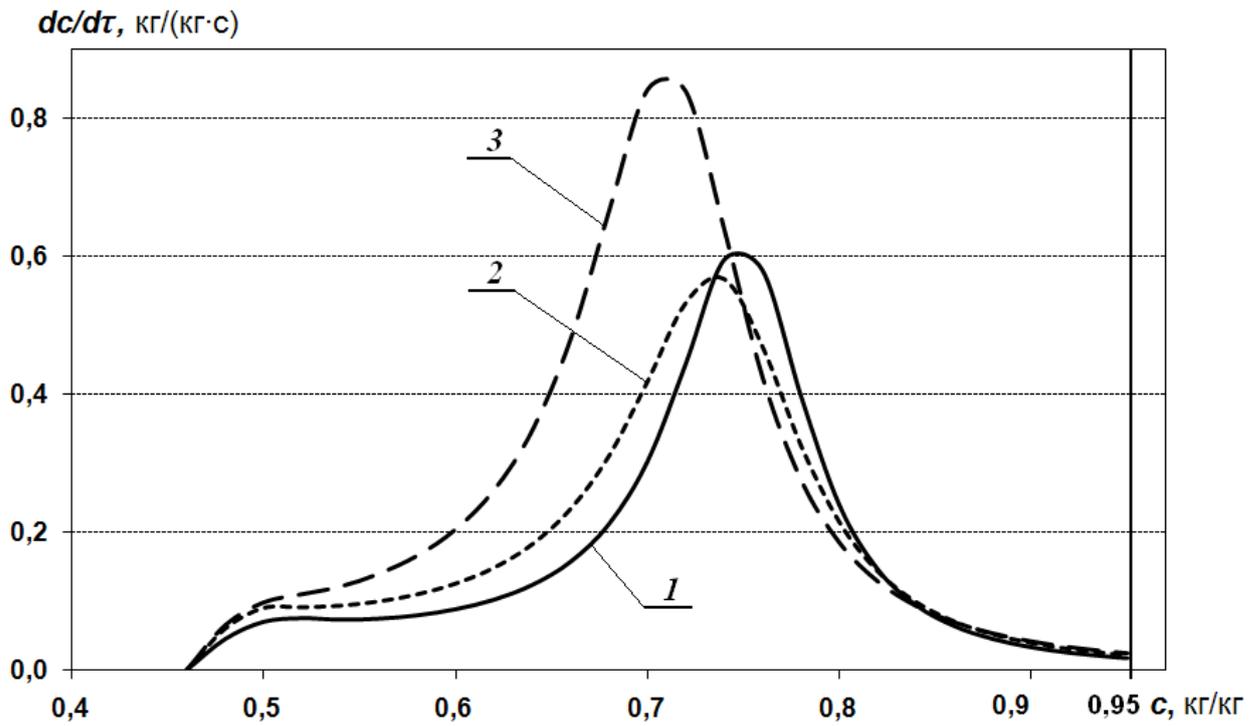


Рисунок 3.14 - Кривые скорости распылительной сушки яичного желтка при $T_{prod} = 278K$:
 1 – при $T_{c.a.} = 423K$; 2 – при $T_{c.a.} = 448K$; 3 – при $T_{c.a.} = 473K$.

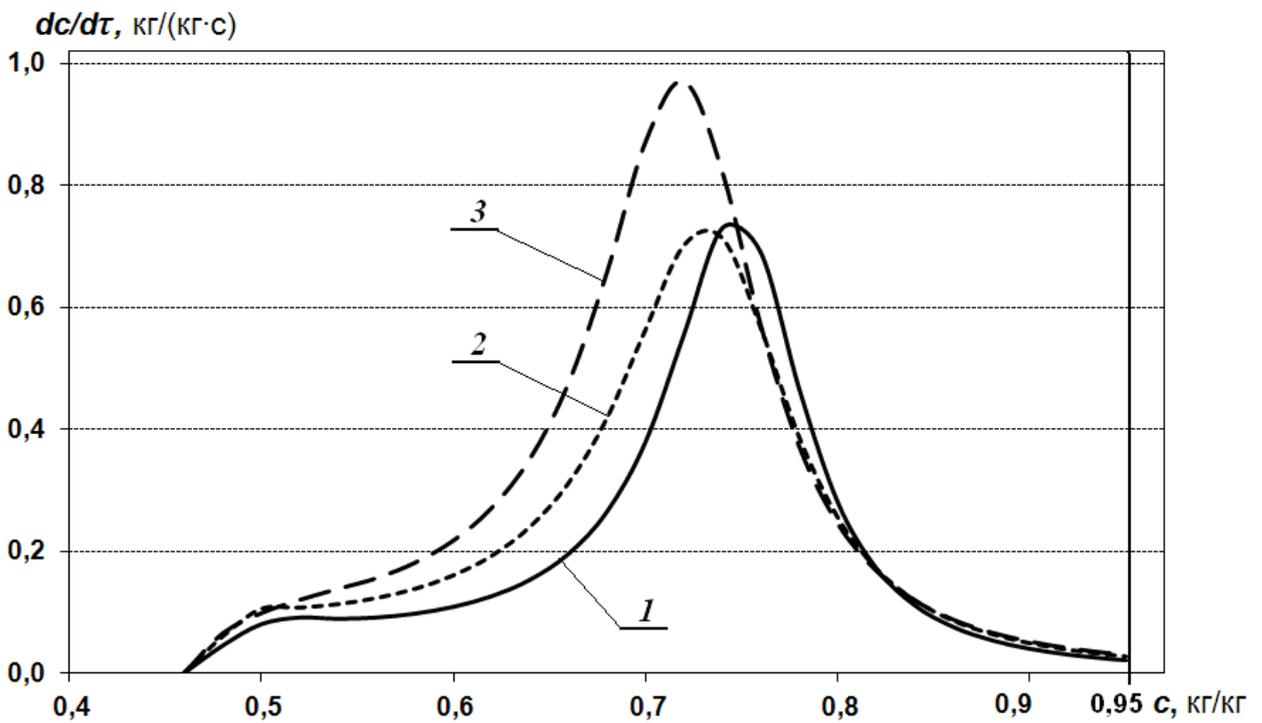


Рисунок 3.15 - Кривые скорости распылительной сушки яичного желтка при $T_{prod} = 298K$:
 1 – при $T_{c.a.} = 423K$; 2 – при $T_{c.a.} = 448K$; 3 – при $T_{c.a.} = 473K$.

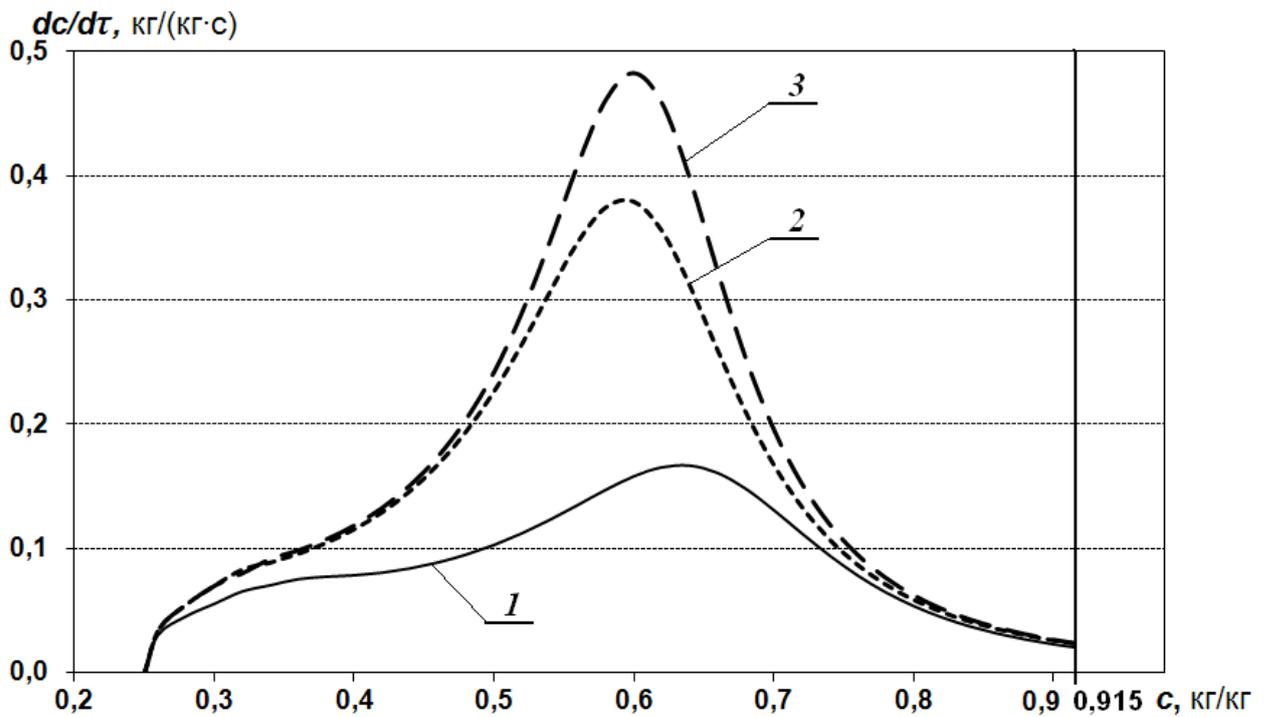


Рисунок 3.16 - Кривые скорости распылительной сушки меланжа при $T_{prod} = 278K$:

1 – при $T_{c.a.} = 423K$; 2 – при $T_{c.a.} = 448K$; 3 – при $T_{c.a.} = 473K$.

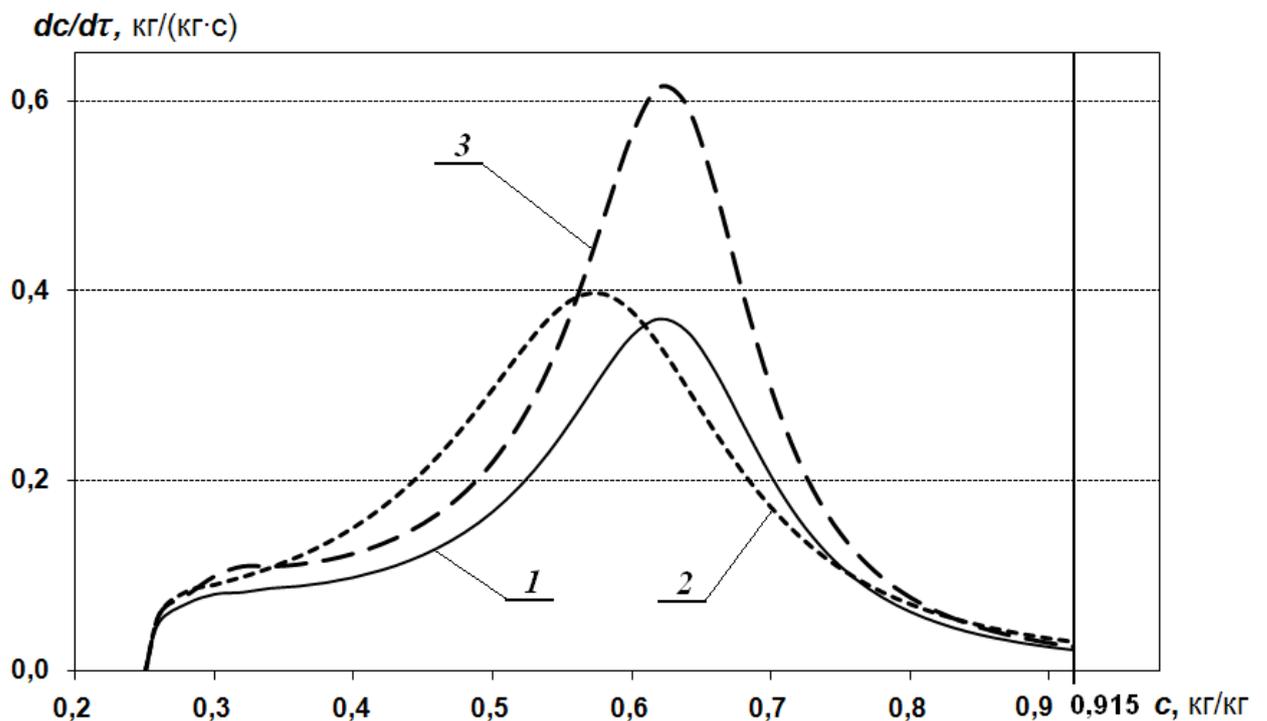


Рисунок 3.17 - Кривые скорости распылительной сушки меланжа при $T_{prod} = 298K$:

1 – при $T_{c.a.} = 423K$; 2 – при $T_{c.a.} = 448K$; 3 – при $T_{c.a.} = 473K$.

Обобщая данные экспериментальных исследований в диапазоне варьирования $T_{c.a.}$ (таблица 3.4 и 3.5) для удобства и оперативности последующих расчетов и математического моделирования процесса, методом точного попадания

в узловые точки рассчитаны кинетические коэффициенты процесса, при этом зависимость (3.4) принимает вид:

$$\frac{dc}{d\tau} = -1 \sqrt{\left[\begin{aligned} &4 \cdot (A_k \cdot Tc.a.^2 + B_k \cdot Tc.a. + C_k) \cdot (1-c)^3 + \\ &+ 3 \cdot (D_k \cdot Tc.a.^2 + E_k \cdot Tc.a. + F_k) \cdot (1-c)^2 + \\ &+ 2 \cdot (G_k \cdot Tc.a.^2 + H_k \cdot Tc.a. + K_k) \cdot (1-c) + \\ &+ (L_k \cdot Tc.a.^2 + M_k \cdot Tc.a. + N_k) \end{aligned} \right]}, \quad (3.5)$$

где $A_k, B_k, C_k, D_k, E_k, F_k, G_k, H_k, K_k, L_k, M_k, N_k$ – кинетические коэффициенты процесса (таблица 3.6 и 3.7).

Величина достоверности аппроксимации составляла не менее $R^2=0,99$.

Таблица 3.6 - Значения кинетических коэффициентов функциональных зависимостей скорости процесса сушки при $T_{prod} = 278K$

Продукт Коэффициент	Яичный белок	Яичный желток	Яичный меланж
A_k	0,02847776	0,04838832	0,08785600
B_k	-25,91691296	-51,46806272	-80,60313600
C_k	5985,64486304	13787,51742128	18587,18380400
D_k	-0,05194136	-0,07304664	-0,13526624
E_k	47,51855656	75,50526744	124,10047504
F_k	-11089,89902144	-19826,52937856	-28709,63678496
G_k	0,03138840	0,03861440	0,06774600
H_k	-28,96887240	-38,72243040	-62,18311800
K_k	6872,56190160	9936,85478160	14470,49278000
L_k	-0,00749944	-0,00844096	-0,01425152
M_k	7,07570824	8,24088816	13,12993392
N_k	-1737,48588576	-2072,97565984	-3094,83082608

Таблица 3.7 - Значения кинетических коэффициентов функциональных зависимостей скорости процесса сушки при $T_{prod} = 298K$

Продукт Коэффициент	Яичный белок	Яичный желток	Яичный меланж
A_k	0,03020152	0,11960184	0,16528448
B_k	-28,28122392	-113,15186264	-148,54090208
C_k	6667,34414608	27012,49246736	33429,74885792
D_k	-0,05976552	-0,15236168	-0,28829376
E_k	56,08067592	144,07256728	259,30704896
F_k	-13284,72838608	-34464,95741872	-58463,16662704
G_k	0,03952696	0,06710800	0,16967688
H_k	-37,20849816	-63,32045600	-152,79256648
K_k	8876,10999584	15160,94155600	34533,14195952
L_k	-0,00999832	-0,01223296	-0,03913624
M_k	9,50382472	11,51201616	35,33325704
N_k	-2305,87655728	-2761,37483584	-8026,61944096

С целью установления рациональных и/или комбинированных режимов при организации распылительной сушки яичных продуктов используя зависимость (3.5) можно рассчитывать значения скорости процесса для различных значений температуры сушильного агента в диапазоне $T_{с.а.} = 423 \dots 473K$. В качестве примера, на рисунке 3.18 – 3.20 в графическом виде представлены кривые скорости сушки яичных продуктов для различных $T_{с.а.}$, построенные с использованием зависимости (3.5).

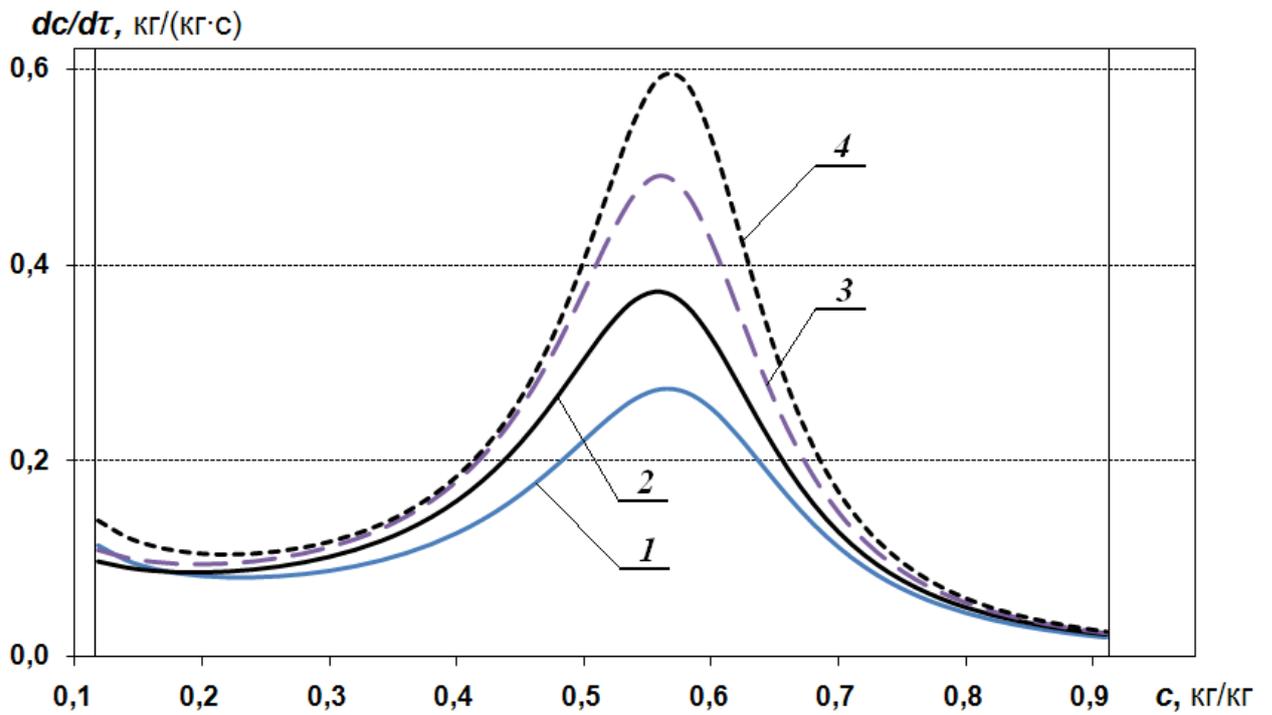


Рисунок 3.18 - Кривые скорости распылительной сушки яичного белка при $T_{prod} = 278\text{K}$:
 1 – при $T_{c.a.} = 425\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 443\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 458\text{K}$; 4 – при $T_{c.a.} = 468\text{K}$.

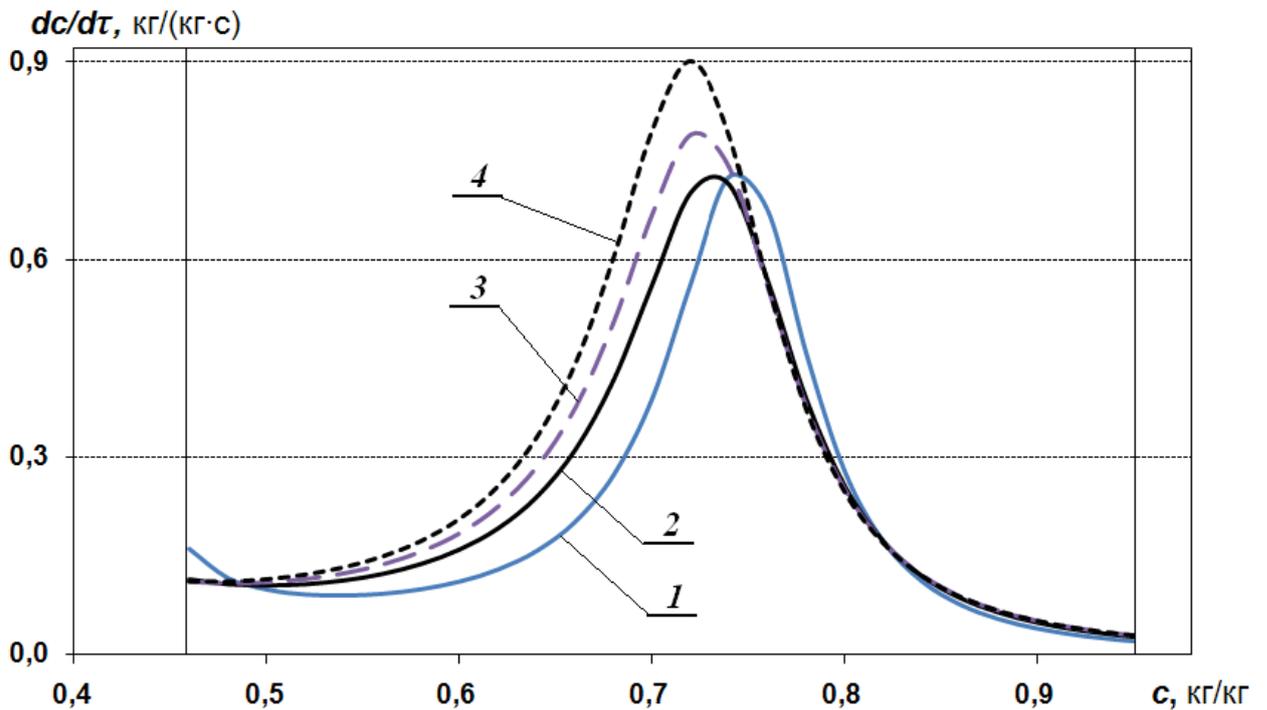


Рисунок 3.19 - Кривые скорости распылительной сушки яичного желтка при $T_{prod} = 298\text{K}$:
 1 – при $T_{c.a.} = 425\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 448\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 458\text{K}$; 4 – при $T_{c.a.} = 468\text{K}$.

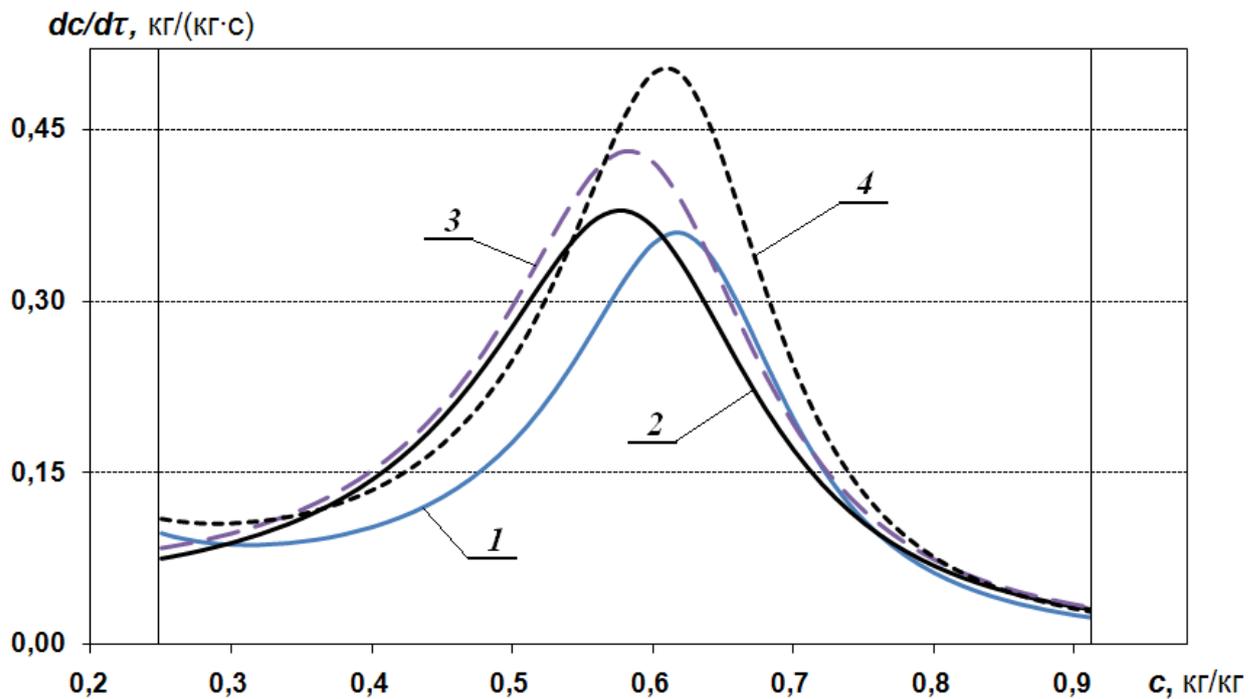


Рисунок 3.20 - Кривые скорости распылительной сушки меланжа при $T_{prod} = 298K$:
 1 – при $T_{c.a.} = 425K$; 2 – при $T_{c.a.} = 443K$; 3 – при $T_{c.a.} = 453K$; 4 – при $T_{c.a.} = 468K$.

Анализ результатов исследований ряда авторов [7,9,11,88,89,120 и др.] и характера кривых скорости сушки (рисунок 3.6 – 3.10) показал, что при интенсивной распылительной сушке яичных продуктов скорость непостоянна и зависимость носит экстремальный характер, при этом наблюдается стремительный рост функции dc/dt до максимального значения с последующим падением. Характер зависимостей скорости (рисунок 3.6 – 3.10) обусловлен процессами формирования капиллярно-пористой структуры частиц продукта при их обезвоживании.

3.3 Анализ механизма внутреннего массопереноса при распылительной сушке яичных продуктов

При интенсивной сушке [9,11] на характер протекания процесса значительное влияние могут оказывать процессы формирования капиллярно-пористой структуры материала. Для анализа тепломассообменных процессов и разработки математических моделей важно различать понятия толстого и тонкого слоя [11,44,85 и др.]. Для физико-математического моделирования процессов

интенсивной распылительной сушки диспергированных частиц продуктов (20 .. 30мкм), целесообразно витающую частицу рассматривать как тонкий слой. Для процессов совместного тепло- и массообмена понятие «тонкий слой» предполагает малые значения теплового и массообменного чисел Био ($Bi_T \ll 1, Bi_M \ll 1$), то есть поля температур и влажности в продукте однородны.

Анализ результатов экспериментально-аналитических исследований ряда авторов [9,11,44,85,88,120 и статьи.] и собственных экспериментов по изучению кинетики сушки показал, что при распылительной сушке наблюдается два периода обезвоживания, что согласуется с основными положениям теории сушки [44,85 и др.].

На первоначальном этапе процесса рост скорости сушки (рисунок 3.12 – 3.20) предопределяет превалирование испарения влаги внутри частицы с образованием пузырьков пара и поверхностной пленки, которая впоследствии сформирует твердую оболочку [84-87]. Движение влаги через пленку частицы происходит в основном в виде пара. В работах [84-87] делается предположение о том, что при уменьшении размера частицы меньше критического, происходит «разворот» частицы и парообразная пленка оказывается уже не внутри, а «обволакивает» поверхность частицы при этом высвобождается структурная влага. Диффузия пара происходит в виде последовательных процессов конденсации пара и испарения влаги на жидких пленках [85].

При снижении влажности происходит переход пленочной структуры в капиллярно-пористое тело вследствие высыхания пленок, их растрескивания и образования разветвленной сети микрокапилляров, движение пара через которые осуществляется путем эффузии при снижающейся скорости процесса.

Таким образом, в системе уравнений тепло- и массопереноса [85] при моделировании коэффициент фазового превращения ε с достаточной точностью можно принять равным 1.

В работах [9,11,80,81,89 и др.] указывается на то, что при высокоинтенсивной сушке, несмотря на малые градиенты влагосодержания и температуры, скорость сушки высока. Это объясняется повышением температуры и давления внутри частицы и подтверждает значительное влияние на процессы

массопереноса градиента избыточного давления пара, который является мощным фактором, интенсифицирующим перенос влаги.

Анализ экспериментальных данных (рисунок 3.12 – 3.20) показывает, что для распылительной сушки яичных продуктов характерно стремительное удаление свободной влаги с поверхности частиц и за счет испарения на первоначальном этапе процесса исключается перегрев продукта. В первый период сушки удаляется преимущественно свободная влага, происходит стремительное уменьшение объема распыленной частицы и увеличение концентрации, что способствует образованию пленок. В конце этого периода, влажность на пленочной поверхности частицы достигает гигроскопического значения. В процессе удаления адсорбционной влаги во втором периоде объем частиц практически не изменяется и интенсифицируется прогрев материала, что подтверждается термограммами [44] и характером полей распределения температур по сечению материала [44,85 и др.].

Во втором периоде происходит углубление зоны испарения вглубь частицы [44,85 и др.] и при этом оформляется ее твердая структура. Температура частиц продукта увеличивается, приближаясь к температуре сушильного агента и в некоторых случаях наблюдается растрескивание и образование пор в объеме материала.

В отличие от обезвоживания твердых капиллярно-пористых структур при сушке распылением имеется ряд специфических особенностей ввиду того, что сушка жидких продуктов происходит интенсивно в каплях малых размеров.

ГЛАВА 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СУШКЕ ЯИЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Комплексное исследование распылительной сушки, включая анализ результатов изучения кинетики процесса, позволяет реализовать математическую постановку и решать задачи совершенствования и рационализации сушильного процесса. Задачей рационализации является разработка рекомендаций по организации экономически целесообразных режимов сушильного процесса для обеспечения наибольшей удельной производительности при минимальной потере качества продукции.

4.1 Анализ влияния основных факторов на удельную производительность при распылительной сушке яичных продуктов

Исследования по рационализации процесса распылительной сушки яичных продуктов проводились с использованием экспериментальных данных по изучению кинетики процесса (п. 3.1) и дополнительно проводилось тестирование установленных различных режимов обезвоживания на экспериментальной установке (рисунок 3.1 и 3.2).

Для различного сочетания значений влияющих факторов (таблица 3.3) было определено экспериментальное время сушки τ_c исследуемых продуктов (таблица 4.1) до принятой конечной влажности W_k .

В качестве целевой функции при рационализации процесса сушки с учетом рекомендаций [11,89,120 и др.], выбрана удельная производительность, которая соответствует съему сухого продукта с единицы объема камеры в единицу времени Π , кг/(м³·ч):

$$\Pi = G_{W_k} / V, \quad (4.1)$$

где G_{W_k} – производительность установки по сухому продукту – порошку, кг/ч; V – рабочий объем сушильной камеры, м³.

$$G_{W_k} = G_{W_h} \cdot (1 - W_h) / (1 - W_k), \quad (4.2)$$

При непрерывном установившемся процессе экспериментальной прямоточной распылительной сушки длина пробега частиц продукта определяет величину задействованного объема сушильной камеры установки, то есть рабочий объем камеры является функцией продолжительности сушки τ_c .

Для начального размера частиц продукта 20 – 30 мкм экспериментально установлена зависимость рабочего объема камеры установки от времени сушки τ_c :

$$V = 0,333838 \cdot \tau_c, \quad (4.3)$$

где τ_c – экспериментальное время сушки, с (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Результаты экспериментального определения удельной производительности распылительной сушилки

№ эксп.	$T_{с.а.}, K$	$T_{прод}, K$	$G_{Wн},$ кг/ч	$G_{Wк},$ кг/ч	τ_c, c	V, m^3	$\Pi,$ кг/(м ³ ·ч)
Яичный белок							
1	423	278	15	1,945055	10,1	3,371784	0,577
2	448	278	15	1,945055	8,2	2,737488	0,711
3	473	278	15	1,945055	6,9	2,303496	0,844
4	423	298	15	1,945055	8,2	2,737488	0,711
5	448	298	15	1,945055	6,7	2,236728	0,870
6	473	298	15	1,945055	5,6	1,869504	1,040
Яичный желток							
1	423	278	6	2,905263	6	2,00304	1,450
2	448	278	6	2,905263	5,2	1,735968	1,674
3	473	278	6	2,905263	4,7	1,569048	1,852
4	423	298	6	2,905263	5	1,6692	1,741
5	448	298	6	2,905263	4,2	1,402128	2,072
6	473	298	6	2,905263	3,9	1,301976	2,231
Яичный меланж							
1	423	278	12	3,278689	9,5	3,17148	1,034
2	448	278	12	3,278689	7,6	2,537184	1,292
3	473	278	12	3,278689	7,1	2,370264	1,383
4	423	298	12	3,278689	8	2,67072	1,228
5	448	298	12	3,278689	6	2,00304	1,637
6	473	298	12	3,278689	6,2	2,069808	1,584

На основе результатов расчетов (таблица 4.1.) для исследуемых продуктов получены аппроксимирующие линейно-степенные зависимости удельной производительности от влияющих факторов:

$$P(Tc.a., T_{prod}) = (a_{\Pi} \cdot T_{prod} + b_{\Pi}) \cdot Tc.a.^2 + (c_{\Pi} \cdot T_{prod} + d_{\Pi}) \cdot Tc.a. + (e_{\Pi} \cdot T_{prod} + f_{\Pi}) \quad (4.4)$$

где a_{Π} , b_{Π} , c_{Π} , d_{Π} , e_{Π} , f_{Π} – эмпирические коэффициенты (таблица 4.2).

Оценка достоверности аппроксимации R^2 зависимости целевой функции от варьируемых параметров для всех зависимостей составляла не менее 0,95. Увеличение показателя степени параметров в полиноме не влияло на величину R^2 .

Таблица 4.2 - Эмпирические коэффициенты функциональных зависимостей удельной производительности сушилки от влияющих факторов

Продукт Коэффициент	Яичный белок	Яичный желток	Яичный меланж
a_{Π}	0,00000046149	-0,000005081415	-0,00001178275
b_{Π}	-0,00012813112	0,00137655077	0,0031416468
c_{Π}	-0,00035113611	0,00464267655	0,01056430165
d_{Π}	0,10282028218	-1,2503104026	-2,809860668
e_{Π}	0,072640275705	-1,040136025515	-2,35073195936
f_{Π}	-21,84780239189	279,994865691271	624,77877915808

Поля значений удельной производительности (рисунок 4.1 – 4.3) для исследуемых продуктов построены с использованием функциональных зависимостей (4.4).

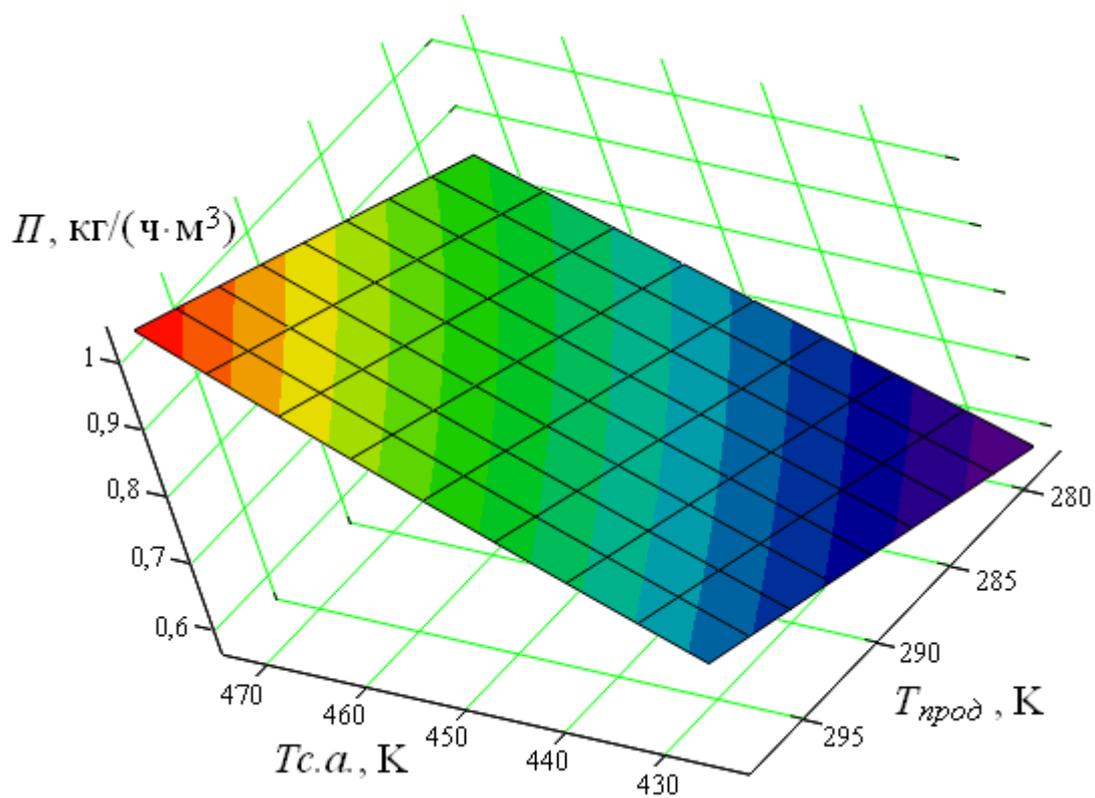


Рисунок 4.1 - Поле значений удельной производительности при сушке яичного белка.

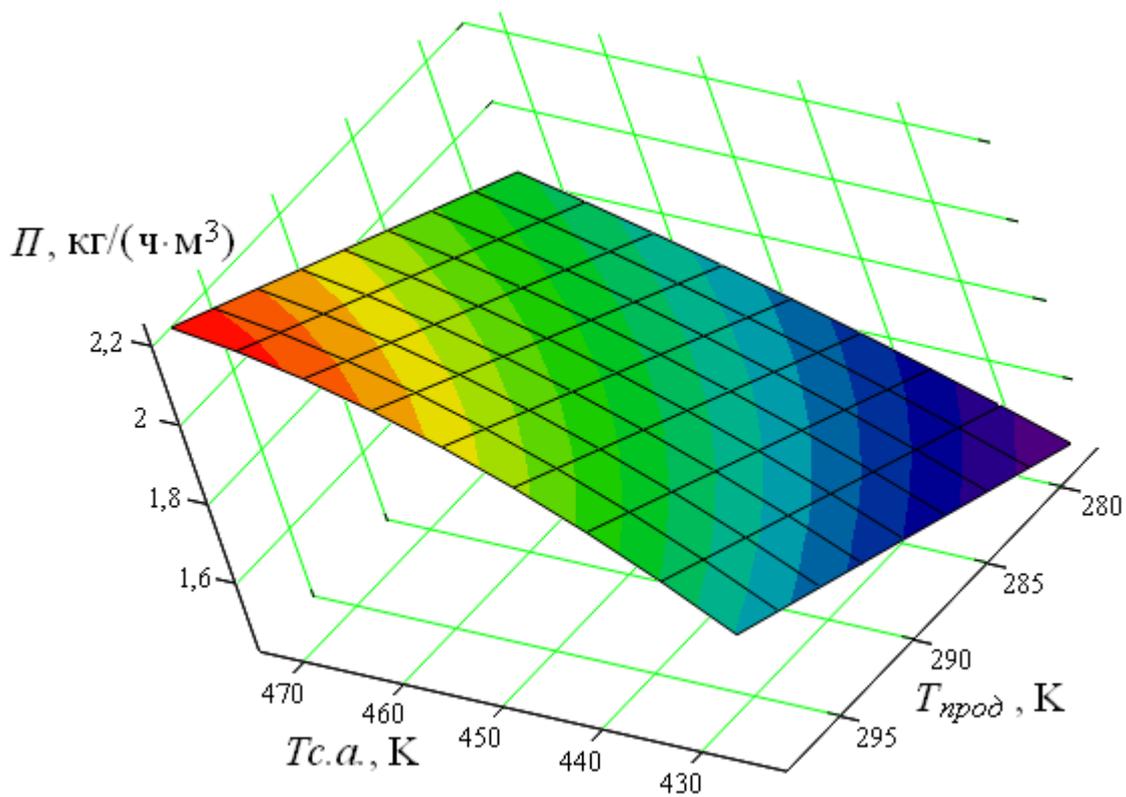


Рисунок 4.2 - Поле значений удельной производительности при сушке яичного желтка.

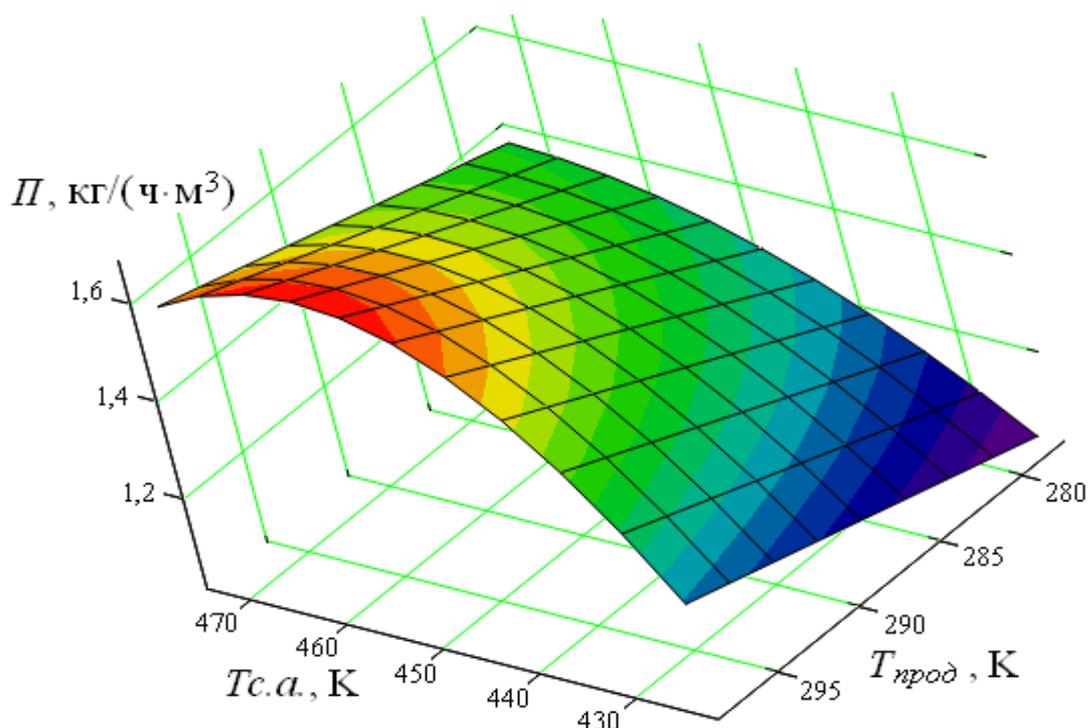


Рисунок 4.3 - Поле значений удельной производительности при сушке яичного меланжа.

В таблицах 4.3 – 4.5 представлены численные значения удельной производительности для исследуемых продуктов при различном сочетании влияющих факторов, определенные с использованием функциональных зависимостей (4.4).

Таблица 4.3 - Удельная производительность при сушке яичного белка

$T_{с.а.}, K$ \ $T_{прод}, K$	423	433	443	453	463	473
278	0,577	0,63	0,684	0,737	0,791	0,844
280	0,59	0,645	0,699	0,754	0,809	0,864
282	0,604	0,659	0,714	0,77	0,827	0,884
284	0,617	0,673	0,73	0,787	0,845	0,903
286	0,63	0,687	0,745	0,803	0,863	0,923
288	0,644	0,702	0,76	0,82	0,881	0,942
290	0,657	0,716	0,776	0,837	0,899	0,962
292	0,67	0,73	0,791	0,853	0,917	0,982
294	0,684	0,744	0,806	0,87	0,935	1,001
296	0,697	0,759	0,822	0,886	0,953	1,021
298	0,711	0,773	0,837	0,903	0,971	1,04

Таблица 4.4 - Удельная производительность при сушке яичного желтка

$T_{с.а.}, K$ $T_{прод}, K$	423	433	443	453	463	473
278	1,45	1,545	1,633	1,713	1,786	1,852
280	1,479	1,58	1,671	1,753	1,826	1,89
282	1,508	1,615	1,71	1,794	1,866	1,928
284	1,537	1,65	1,749	1,834	1,907	1,966
286	1,566	1,685	1,787	1,875	1,947	2,004
288	1,595	1,719	1,826	1,915	1,987	2,042
290	1,624	1,754	1,865	1,956	2,027	2,079
292	1,653	1,789	1,903	1,996	2,068	2,117
294	1,682	1,824	1,942	2,037	2,108	2,155
296	1,711	1,859	1,981	2,077	2,148	2,193
298	1,741	1,894	2,019	2,118	2,188	2,231

Таблица 4.5 - Удельная производительность при сушке яичного меланжа

$T_{с.а.}, K$ $T_{прод}, K$	423	433	443	453	463	473
278	1,034	1,157	1,254	1,324	1,367	1,383
280	1,053	1,186	1,288	1,358	1,396	1,403
282	1,073	1,215	1,322	1,392	1,426	1,423
284	1,092	1,244	1,355	1,426	1,455	1,443
286	1,111	1,273	1,389	1,46	1,484	1,464
288	1,131	1,302	1,423	1,494	1,514	1,484
290	1,15	1,331	1,457	1,527	1,543	1,504
292	1,169	1,36	1,491	1,561	1,573	1,524
294	1,189	1,389	1,524	1,595	1,602	1,544
296	1,208	1,418	1,558	1,629	1,631	1,564
298	1,228	1,447	1,592	1,663	1,661	1,584

По уравнению (4.4) с помощью опции «maximize» в среде программного обеспечения Mathcad Professional были определены максимум удельной производительности (целевой функции) и соответствующие ему рациональное сочетание значений режимных параметров (таблица 4.6). Так как для меланжа в ходе экспериментов установленный рациональный режим не являлся уровнем

варьирования факторов, то время сушки можно рассчитать с использованием зависимостей (4.1) – (4.3) (таблица 4.6).

Таблица 4.6 - Максимум удельной производительности, время сушки и рациональные значения варьируемых параметров

Продукт \ Параметр	Параметр			
	$P, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$	$\tau_c, \text{ с}$	$T_{c.a.}, \text{ К}$	$T_{prod.}, \text{ К}$
Яичный белок	1,04	5,6	473	298
Яичный желток	2,23	3,9	473	298
Яичный меланж	1,67	5,9	458	298

Анализ характера полей значений удельной производительности (рисунок 4.1 – 4.3) показал, что с ростом температур продукта и сушильного агента значительно интенсифицируются тепломассообменные процессы, что приводит к росту целевой функции за счет снижения общей продолжительности сушки.

Увеличение удельной производительности при увеличении исходной температуры продукта (рисунок 4.1 – 4.3) в диапазоне $T_{prod} = 278 \dots 298\text{К}$ очевидно, так как сокращаются затраты на прогрев продукта. Верхний предел начальной температуры ограничен на основе анализа результатов предварительных исследований и соответствует температуре в производственных помещениях. Нижний предел $T_{prod} = 278\text{К}$ соответствует температуре хранения жидких яичных продуктов [18,19,75,93,139,141].

С ростом температуры сушильного агента удельная производительность установки существенно увеличивается (рисунок 4.1 – 4.3), однако при этом увеличивается температура частиц продукта. Термовоздействие, приводящее к перегреву продукта выше 333К снижает качество термолабильных яичных продуктов. На основе анализа качественных показателей получаемых порошков рекомендован верхний предел температуры сушильного агента $T_{c.a.} = 523 \text{ К}$. Температурные режимы при сушке яичных продуктов важны, следовательно, рациональный режим обезвоживания должен устанавливаться индивидуально для каждого продукта.

Зависимость удельной производительности Π от температуры сушильного агента $T_{с.а.}$ для яичного меланжа носит экстремальный характер (рисунок 4.3). При росте фактора $T_{с.а.}$ достигается максимум съема сухого продукта с единицы объема камеры, а далее отмечается незначительное снижение целевой функции (рисунок 4.3). Уменьшение значений Π при $T_{с.а.} > 458\text{K}$ для яичного меланжа обусловлено тем, что при стремительном обезвоживании распыленных капель интенсивно протекают процессы формирования капиллярно-пористой структуры частиц и при этом могут возникать условия для резкого образования сухой плотной оболочки на поверхности капель, что приводит к иммобилизации жидкости и, как следствие, появлению в ходе процесса дополнительной связи влаги, на преодоление которой, дополнительно расходуется энергия теплоносителя, что снижает удельную производительность сушильной установки при увеличении продолжительности процесса (кривые сушки). Эффект образования сухой плотной оболочки капель при распылительной сушке и ее оболочки влияние на кинетику процесса сушки отмечен в ряде работ [44,80,85].

Оценить поля температур в движущихся тонкодисперсных частицах при высокой интенсивности процесса промышленной распылительной сушки экспериментально невозможно. Следовательно, очевидна необходимость реализации математической модели тепломассопереноса с целью расчета температур в течение процесса сушки в каждой пространственной точке объекта обезвоживания для управления качеством продукции при реализации различных температурных режимов при сушке.

Для яичного меланжа при $T_{с.а.} = 458\text{K}$ проведено тестирование установленного режима сушки (таблица 4.6) на экспериментальной установке рисунок 3.1 и рисунок 3.2 по описанной выше методике (Приложение 2). В ходе эксперимента получена кривая сушки (рисунок 4.4), установлена функциональная математическая зависимость $\tau(W)$ (рисунок 4.5) и определены эмпирические коэффициенты зависимости для скорости процесса сушки (таблица 4.7). Для дальнейшего анализа построена зависимость скорости процесса для меланжа (рисунок 4.6).

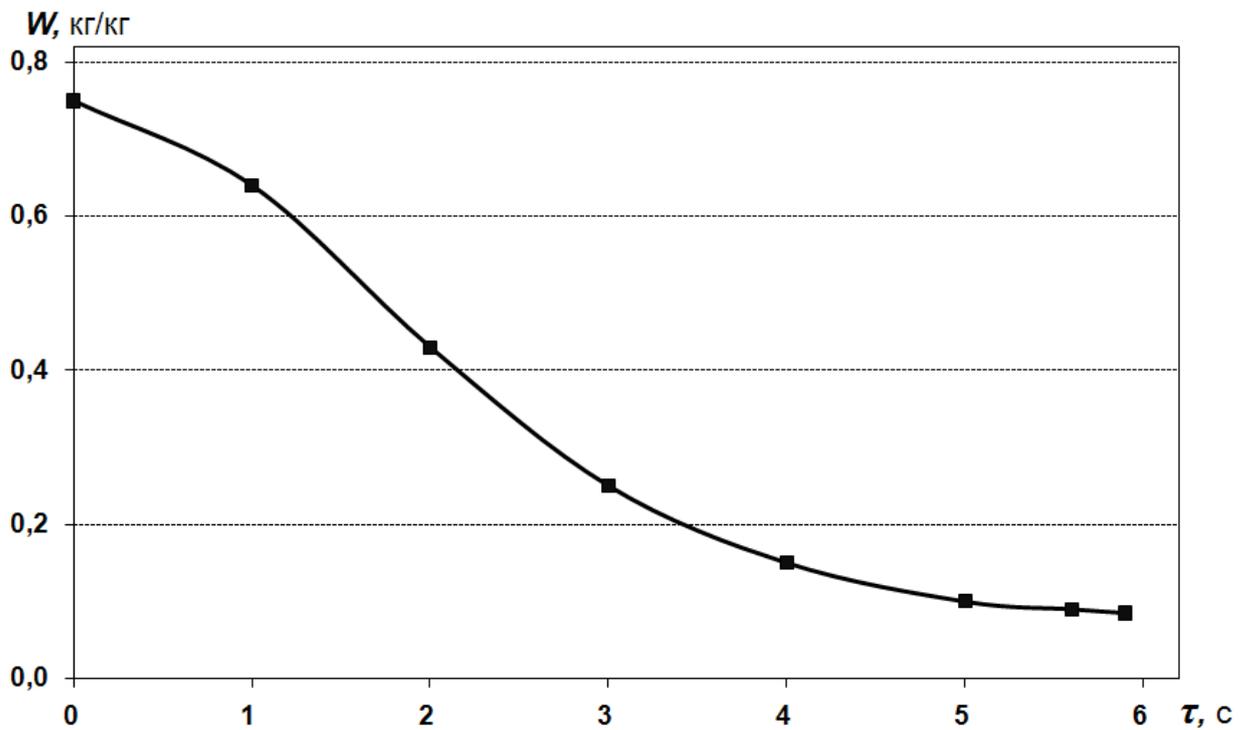


Рисунок 4.4 - Кинетика распылительной сушки яичного меланжа при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 458K$.

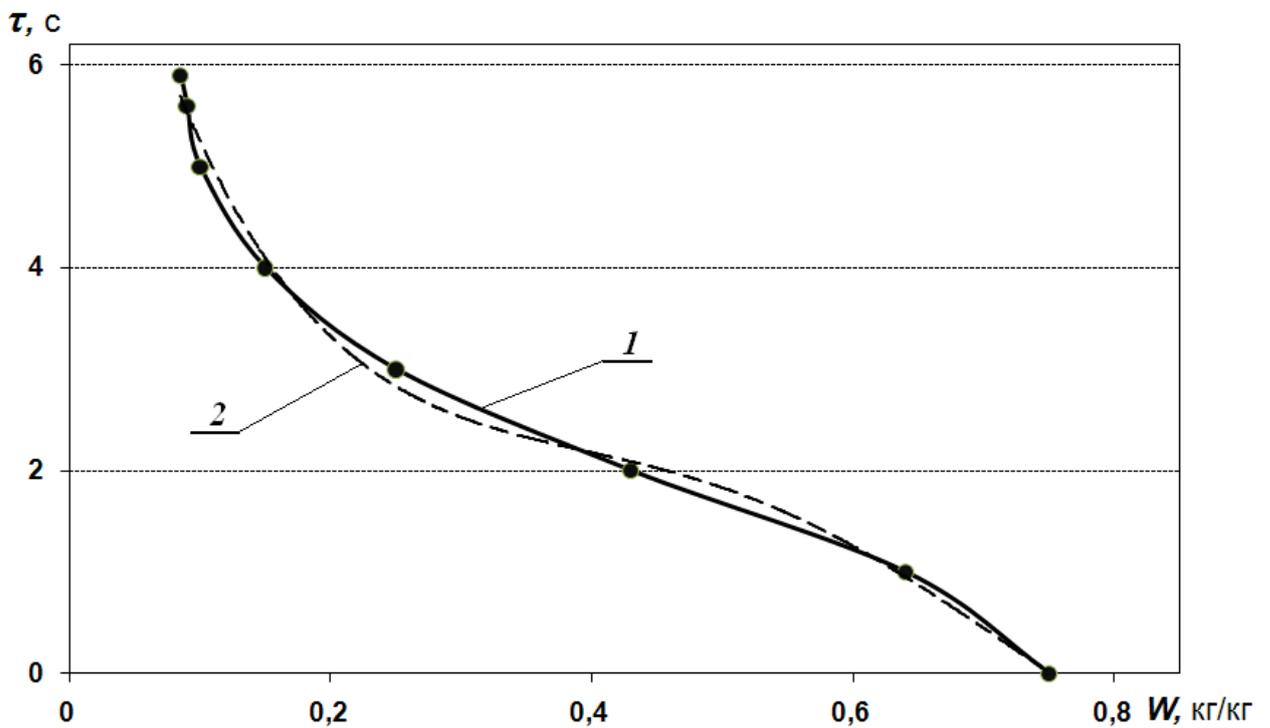


Рисунок 4.5 - Зависимость времени процесса от влажности при распылительной сушке яичного меланжа (при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 458K$): 1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая функциональная зависимость.

Таблица 4.7 - Значения эмпирических коэффициентов функциональной зависимости скорости процесса сушки яичного меланжа при рациональном режиме

a_k	68,7494
b_k	-174,1905
c_k	146,2476
d_k	-53,3620
e_k	10,49

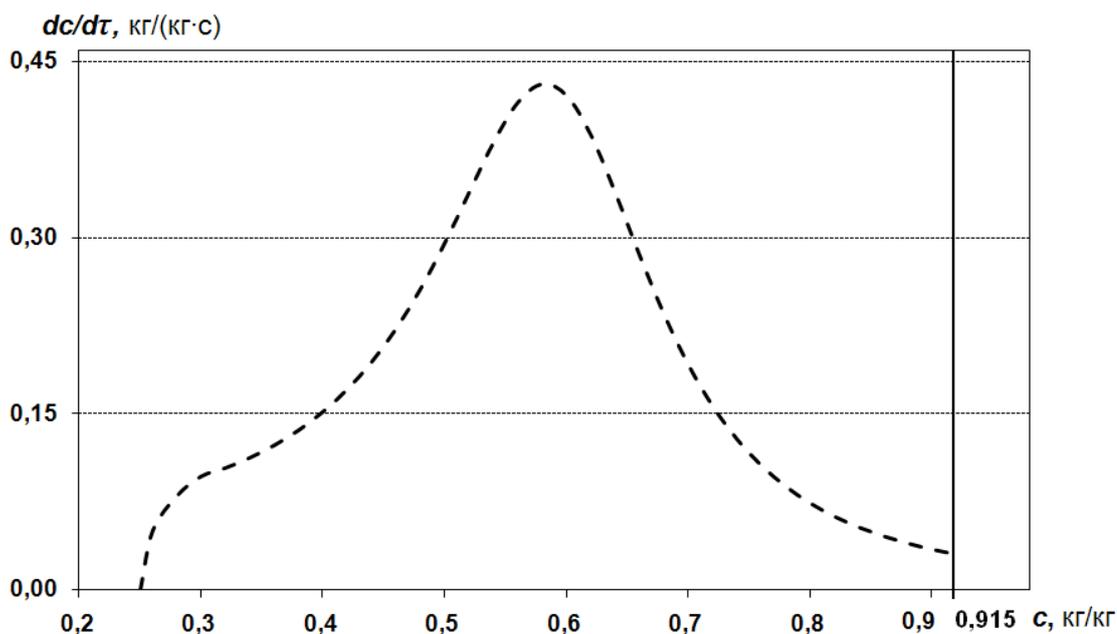


Рисунок 4.6 - Кривые скорости распылительной сушки яичного меланжа при $T_{prod} = 298K$ и $T_{с.а.} = 458K$.

Анализ качественных показателей сухих яичных продуктов, полученных в ходе комплекса экспериментов, в том числе при рациональных режимах (таблица 4.6), показал соответствие образцов требованиям ГОСТ Р 53155-2008 «Продукты яичные жидкие и сухие пищевые. Технические условия».

4.2 Разработка рациональных комбинированных режимов сушки яичных продуктов

Разработка режимов производилась для решения ряда задач при организации сушки яичных продуктов:

- Повышение удельной производительности промышленных сушильных комплексов при сокращении времени процесса и уменьшении габаритов сушильной камеры.

- Повышение показателей качества производимой продукции (растворимость, обсемененность, пенообразующая способность и др.) при сокращении термического воздействия на термолабильные продукты.

- Разработки рациональной конструкции сушильной установки.

- Усовершенствование конструкций действующих сушилок и др.

Во времени процесса распылительной сушки происходит стремительное изменение параметров объекта обезвоживания (влажности, температуры, структуры и др.), что обуславливает целесообразность варьирования режимных параметров в процессе сушки для создания условий способствующих достижению высокого качества продукции при максимальной интенсивности тепломассообменных процессов.

Реализация непрерывно варьируемых в процессе режимных параметров для создания рациональных/оптимальных условий сушки на современном уровне развития сушильной техники экономически не оправдана, но разумна позонная дискретная рационализация процесса сушки.

Таблица 4.8 - Максимум скорости сушки, содержание сухих веществ, соответствующее максимальной скорости процесса и рациональные значения параметров

Параметр Продукт	$(dc/d\tau)^{\max}$, кг/(кг·с)	c_{zp} , кг/кг	τ_c^{zp} , с	$T_{c.a.}$, К	$T_{prod.}$, К
Яичный белок	0,79	0,535	2,168	473	298
Яичный желток	0,973	0,718	1,327	473	298
Яичный меланж	0,431	0,583	3,117	458	298

Принимая во внимание характер кривых скорости распылительной сушки и наличие характерных участков (рисунок 3.12 – 3.20) для исследуемых продуктов предложена 2-х зонная сушка и определены значения содержания сухих веществ c_{zp} , кг/кг, соответствующие границам зон. За границу принято содержание сухих веществ c_{zp} , соответствующее максимальной скорости процесса. Максимальное

значение скорости сушки $(dc/d\tau)^{\max}$ и $c_{зр}$ для любого сочетания варьируемых $T_{прод}$ и $T_{с.а.}$ можно определить используя зависимости (3.4) или (3.5) и опцию «maximize» в среде специализированного программного обеспечения Mathcad Professional. Для ранее установленных рациональных режимов (таблица 4.6) в таблице 4.8 представлены определенные $(dc/d\tau)^{\max}$ и $c_{зр}$.

С помощью зависимости (4.1) при замене $W = 1 - c$ определено время сушки $\tau_c^{зр}$, с до достижения $c_{зр}$, то есть, установлена продолжительность первого периода процесса влагоудаления (таблица 4.8). Значения $\tau_c^{зр}$, с учетом расхода сушильного агента, позволяют производить расчет рабочего объема и высоту сушильной камеры для реализации первой зоны сушки.

Предложена 2-х зонная рационализация распылительной сушки при комбинации прямотока, на создание которого расходуется 2/3 потока сушильного агента и дополнительной перекрестной подачи 1/3 общего расхода сушильного агента в периоде падающей скорости сушки. В сравнении с традиционным прямоточным контактом, предложенная организация процесса позволяет создать более активную нестационарную аэродинамическую обстановку взаимодействия фазовых потоков в сушильной камере и равномерное распределение температур и влажности сушильного агента по высоте камеры. Соотношение расходов принято на основании результатов исследования кинетики сушки и серии экспериментов.

Таблица 4.9 - Значения эмпирических коэффициентов функциональных зависимостей $\tau(W)$ и скорости процесса сушки $dc/d\tau(c)$ при рациональных режимах и комбинации прямоток – перекрестный ток

Продукт Коэффициент	Яичный белок	Яичный желток	Яичный меланж
a_k	14,2591	211,5668	131,1594
b_k	-57,1543	-346,0441	-269,0060
c_k	63,0857	190,0514	188,7137
d_k	-29,2050	-44,8993	-57,7708
e_k	7,317	5,3809	10,5251

Проведены исследования кинетики 2-х зонной распылительной сушки при рациональных значениях варьируемых параметров (таблица 4.6) на экспериментальной установке (рисунок 3.1, 3.2) по описанной выше методике. Результаты исследования сведены в таблице Приложение 2. Для перекрестной подачи сушильного агента был задействован байпас 2 с регулирующей дроссельной заслонкой (рисунок 3.2). В ходе эксперимента получены кривые сушки (рисунок 4.7, 4.9 и 4.11), определены эмпирические коэффициенты зависимостей для времени (3.1) и скорости (3.4) процесса сушки (таблица 4.9), а также построены зависимости скорости процесса от c (рисунок 4.8, 4.10 и 4.12).

Установлено (п. 3.1), что рабочий объем камеры является функцией продолжительности сушки. В ходе серии экспериментов получена зависимость V от времени τ_c для 2-х зонной сушки и начального размера частиц продукта 20 – 30мкм:

$$V = 0,3325 \cdot \tau_c, \quad (4.5)$$

где τ_c – экспериментальное время сушки, с (таблица 4.10).

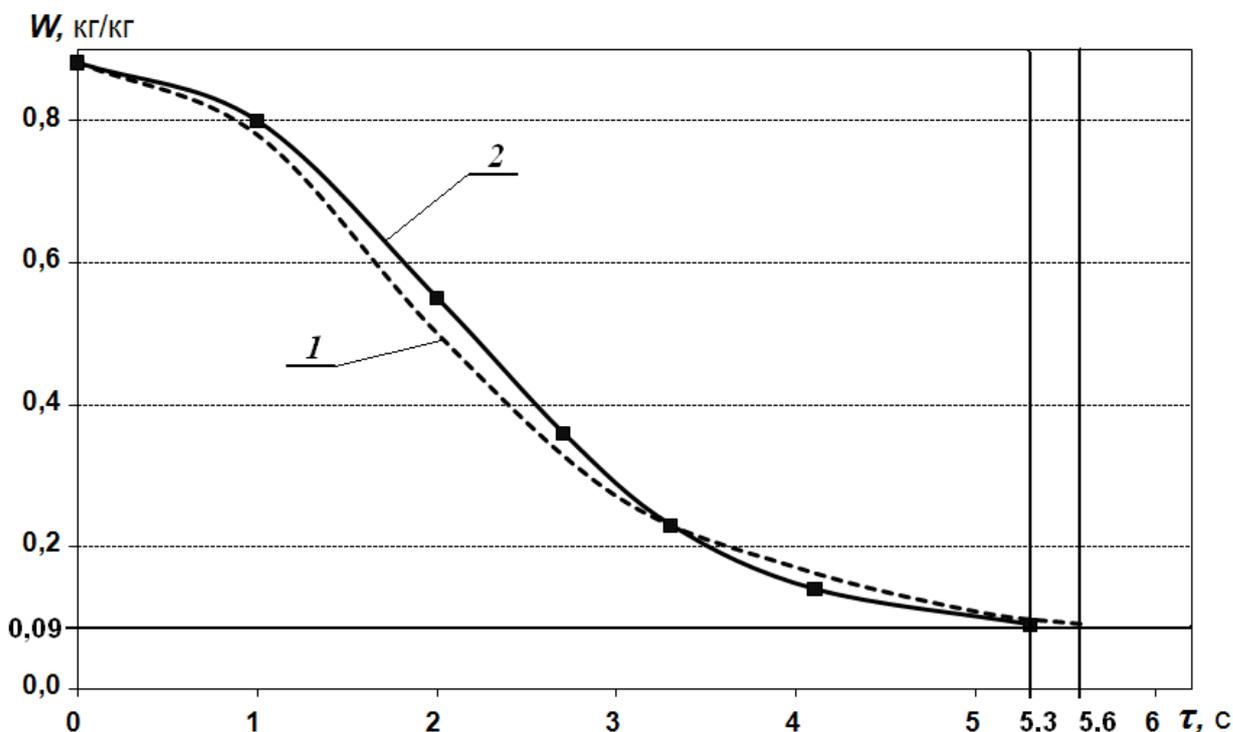


Рисунок 4.7 - Кинетика распылительной сушки яичного белка при $T_{prod} = 298K$ и $T_{с.а.} = 473K$: 1 – прямоток; 2 –прямоток – перекрестный ток.

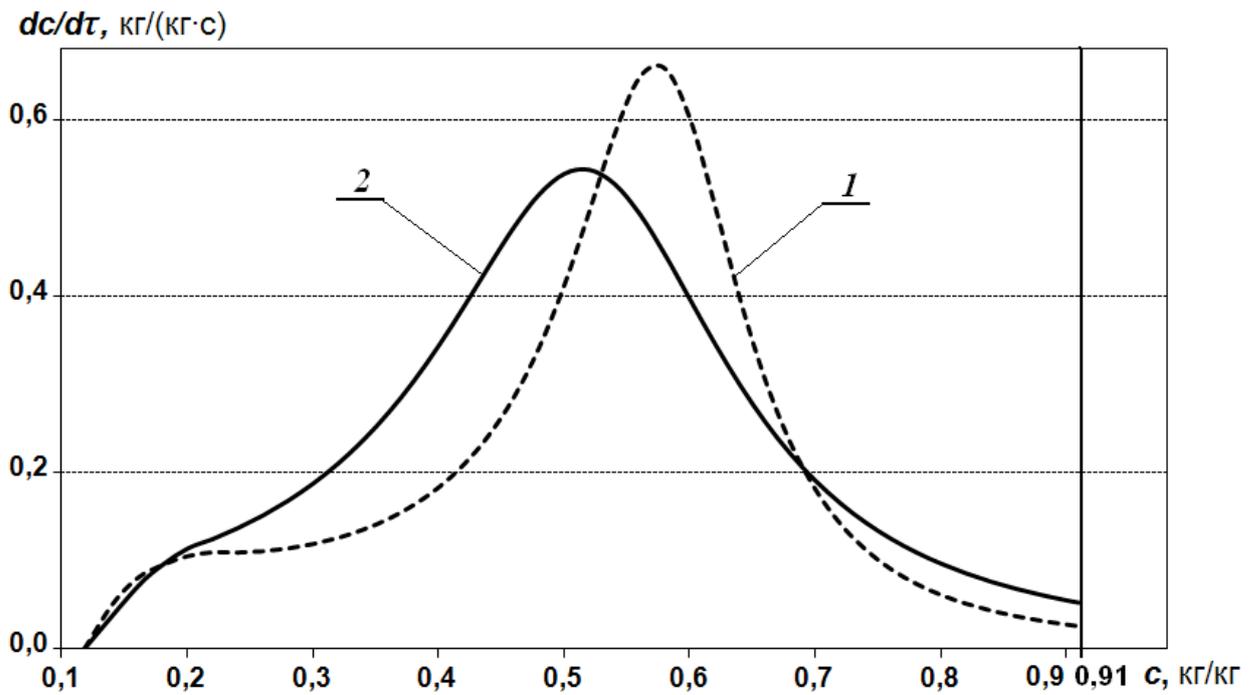


Рисунок 4.8 - Кривые скорости распылительной сушки яичного белка при $T_{\text{прод}} = 298\text{К}$ и $T_{\text{с.а.}} = 473\text{К}$: 1 – прямоток; 2 –прямоток – перекрестный ток.

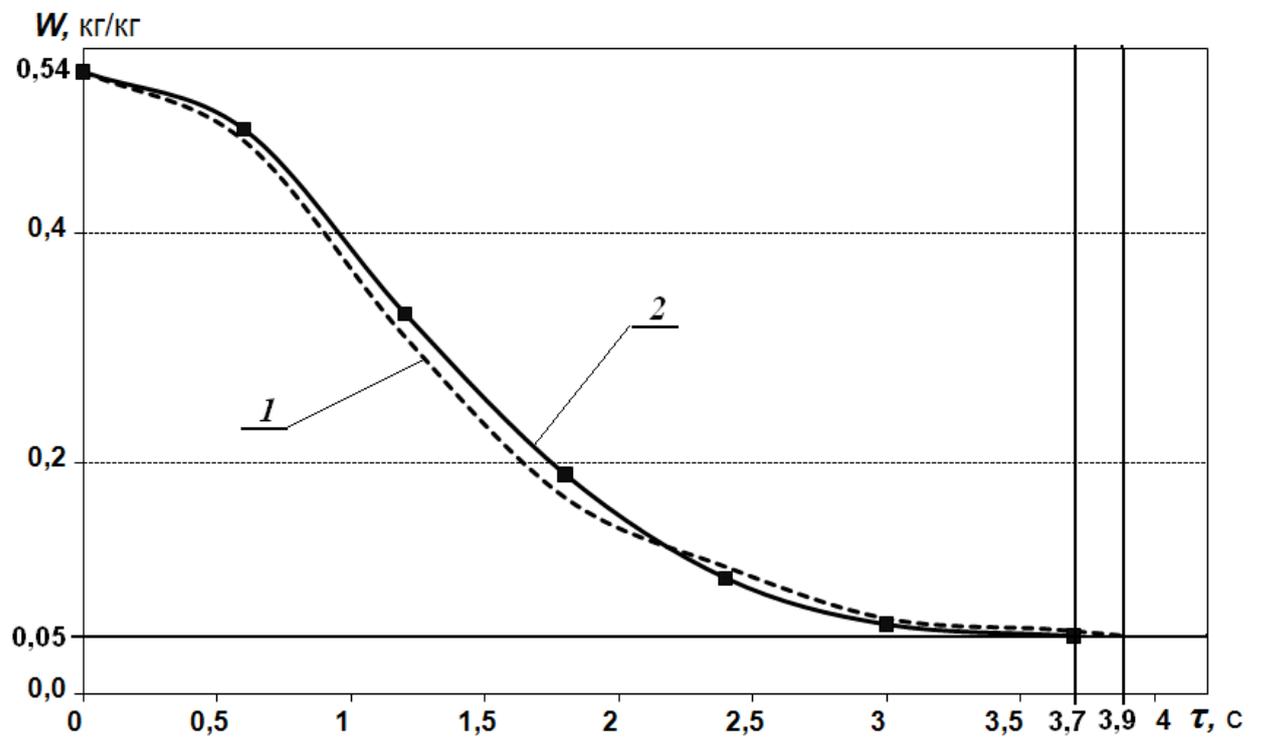


Рисунок 4.9 - Кинетика распылительной сушки яичного желтка при $T_{\text{прод}} = 298\text{К}$ и $T_{\text{с.а.}} = 473\text{К}$: 1 – прямоток; 2 –прямоток – перекрестный ток.

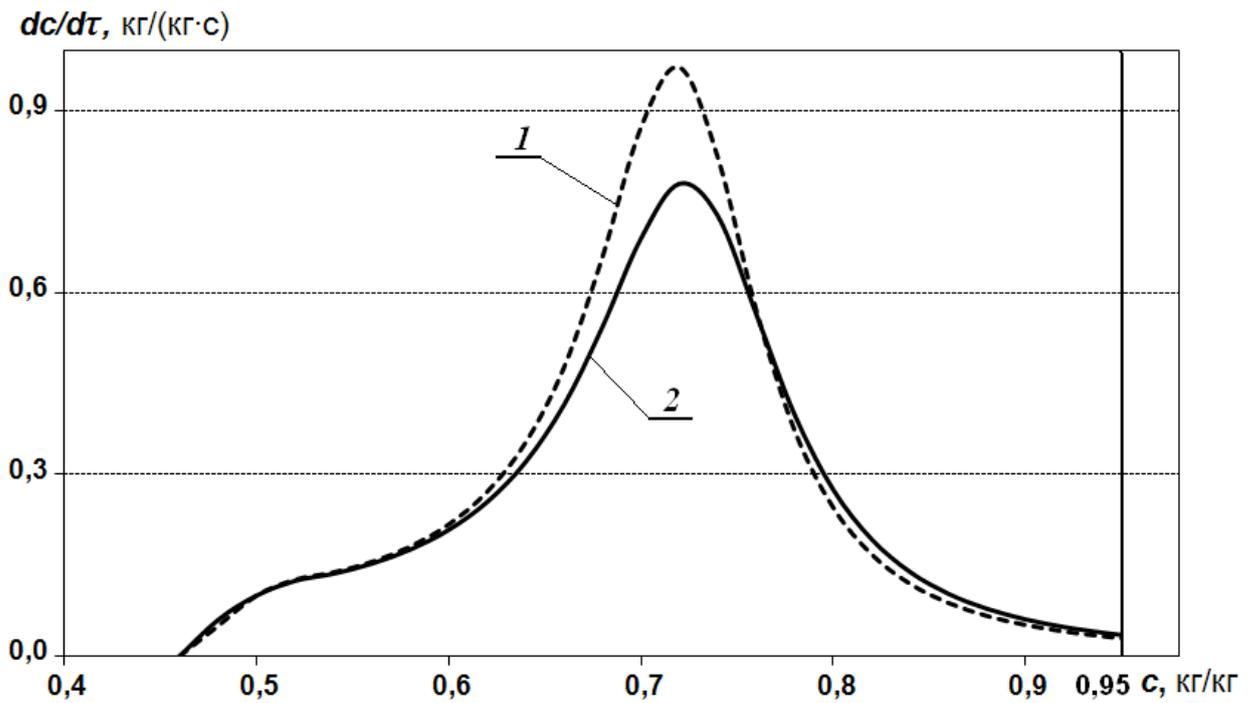


Рисунок 4.10 - Кривые скорости распылительной сушки яичного желтка при $T_{\text{прод}} = 298\text{K}$ и $T_{\text{с.а.}} = 473\text{K}$: 1 – прямоток; 2 –прямоток – перекрестный ток.

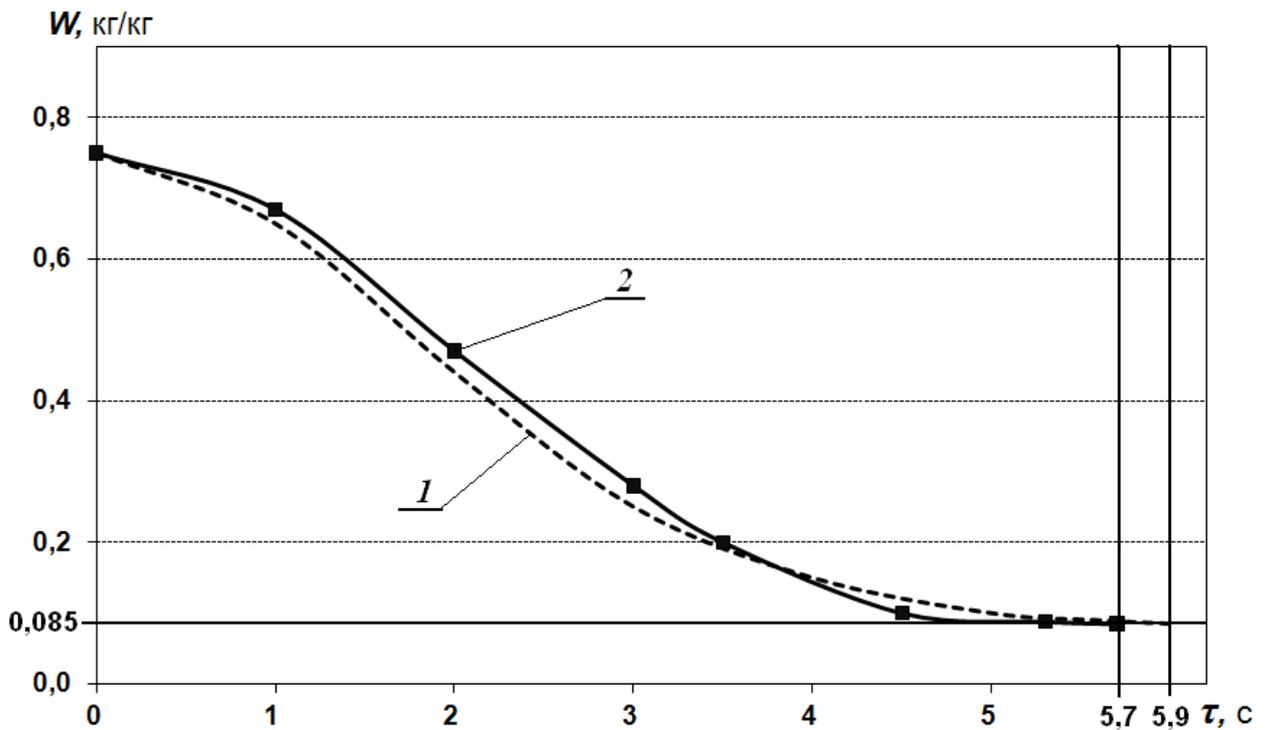


Рисунок 4.11 - Кинетика распылительной сушки яичного желтка при $T_{\text{прод}} = 298\text{K}$ и $T_{\text{с.а.}} = 473\text{K}$: 1 – прямоток; 2 –прямоток – перекрестный ток.

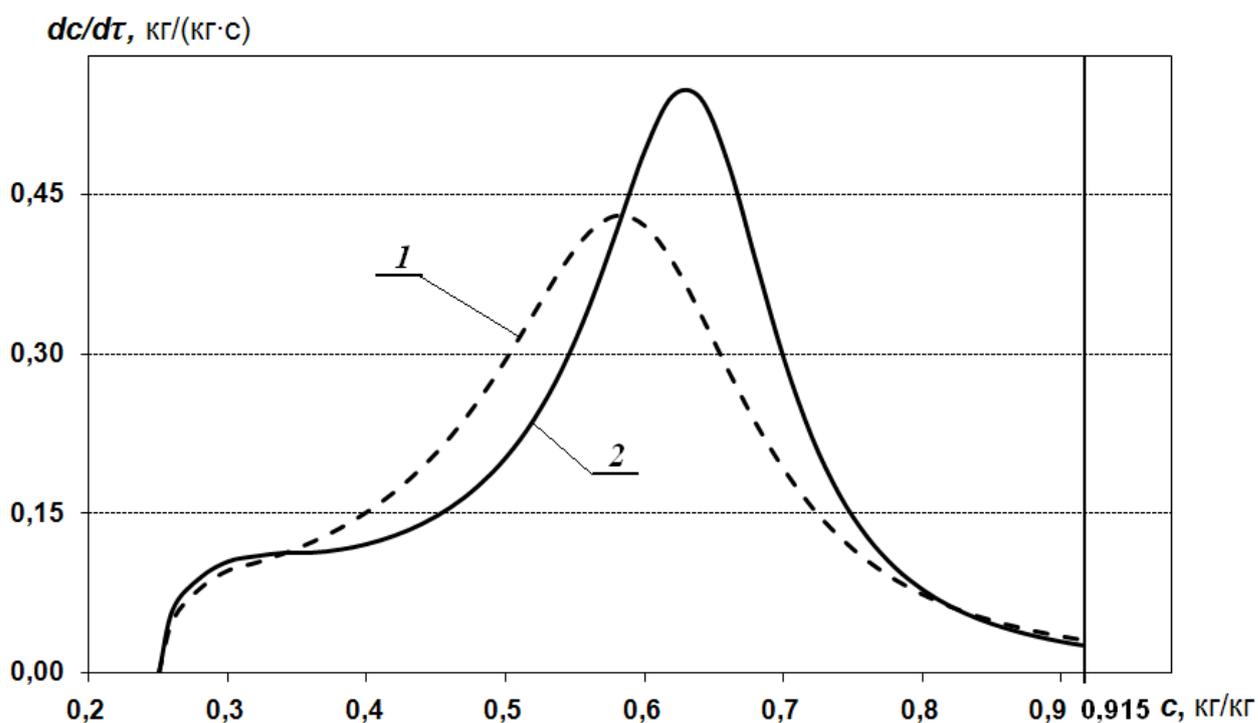


Рисунок 4.12 - Кривые скорости распылительной сушки яичного меланжа при $T_{prod} = 298\text{K}$ и $T_{c.a.} = 458\text{K}$: 1 – прямоток; 2 – прямоток – перекрестный ток.

На основе результатов исследований установлено экспериментальное время сушки до требуемой конечной влажности продуктов и по формуле (4.1) определена удельная производительность сушилки при 2-х зонной распылительной сушке (таблица 4.10).

Таблица 4.10 - Результаты экспериментального определения удельной производительности 2-х зонной распылительной сушилки

Продукт	$T_{c.a.}, \text{K}$	T_{prod}, K	$G_{Wн}, \text{кг/ч}$	$G_{Wк}, \text{кг/ч}$	$\tau_c, \text{с}$	$V, \text{м}^3$	$\Pi, \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$
Яичный белок	473	298	15	1,945055	5,3	1,76225	1,104
Яичный желток	473	298	6	2,905263	3,7	1,23025	2,362
Яичный меланж	458	298	12	3,278689	5,7	1,89525	1,73

В таблице 4.10 представлено сравнение результатов определения удельной производительности при различной организации процесса распылительной сушки (таблица 4.6 и 4.10), которое позволяет сделать вывод о том, что удельный съем

сухого продукта повышается при создании более активной аэродинамической обстановки при взаимодействии потоков.

Таблица 4.10 - Удельная производительность при различной организации процесса распылительной сушки

Продукт \ Параметр	Π , кг/(м ³ ·ч); прямоток	Π , кг/(м ³ ·ч); прямоток и перекрестный ток	прирост, %
Яичный белок	1,04	1,104	6,15
Яичный желток	2,23	2,362	5,92
Яичный меланж	1,67	1,73	3,59

Таким образом, создание более активной аэродинамической обстановки взаимодействия потоков при 2-х зонной сушке интенсифицирует тепломассообменные процессы и по сравнению с прямотоком позволяет:

- увеличить удельный выход готовой продукции при модернизации действующих сушильных установок;
- повысить качество продукции за счет смягчения режима термического воздействия при сохранении производительности;
- сократить энергетические затраты на сушку;
- уменьшить размеры сушильной камеры при проектировании сушильной техники и др.

Полученные функциональные зависимости (4.4) рекомендуется использовать для расчета рациональных параметров при проектировании, пуск/наладке и эксплуатации установок для распылительной сушки яичных продуктов. Рекомендованные рациональные режимы (таблица 4.6 и 4.7) позволяют использовать для обезвоживания яичных продуктов типовые конструкции распылительных сушильных установок. При уточнении параметров в ходе пуско-наладочных работ, разработанные режимы можно рекомендовать для практического внедрения на предприятиях различной мощности, специализирующихся на переработке яйцепродуктов.

ГЛАВА 5. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ВЫСУШИВАЕМОЙ ЧАСТИЦЕ ПРИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКЕ ЯИЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

Стадия сушки энергоемка и в значительной степени определяет стоимость готового продукта, а также оказывает влияние на качественные показатели товарной продукции.

Для обеспечения высокого качества сухих яичных продуктов определяющее значение имеет режим сушки. Потеря качества термолабильных яичных продуктов, как и большинства пищевых продуктов, при сушке происходит в результате их нагрева выше 52-60°C, при которой происходит термическое разложение ценных компонентов, денатурация белков и снижение растворимости. Для обеспечения соответствия качественных показателей требованиям ГОСТ Р 53155-2008 «Продукты яичные жидкие и сухие пищевые. Технические условия», температуру яичной массы не рекомендуется превышать 48 – 50°C [18,19,75,93,139,141].

В производственной практике распространенным приемом повышения эффективности распылительных сушильных комплексов при уменьшении расхода сушильного агента, снижении энергозатрат и удельных габаритов сушильной камеры, считается повышение исходной температуры сушильного агента и/или начальной температуры продукта, подаваемого на сушку. Применительно к яичным продуктам этот прием повышения эффективности сушильной установки вступает в противоречие с необходимостью обеспечения высокого качества конечных продуктов.

Таким образом, качественную сушку яичных продуктов следует выполнять, строго контролируя и регулируя все параметры процесса, включая температуру объектов обезвоживания.

Определить поля температур в витающих тонкодисперсных частицах при значительной интенсивности процесса промышленной распылительной сушки экспериментально невозможно, а значит, очевидна необходимость реализации математической модели тепломассопереноса с целью расчета температур в каждой

пространственной точке объекта обезвоживания в течение процесса сушки для управления качеством продукции.

При внедрении рациональных режимов и конструкций аппаратов для сушки, в первую очередь надлежит обеспечить на практике условия для получения требуемых технологических характеристик высушиваемого материала. Оценка эволюции нестационарных полей температур в высушиваемом материале возможна путем решения системы дифференциальных уравнений влаго- и теплопереноса [11,44,85,86 и др.]. Аналитически решить данную систему и с высокой точностью рассчитать поля температур затруднительно без ряда допущений.

Реализация математической модели тепломассопереноса проводилась с учетом положений и допущений, аргументированных в работах И.Ю. Алексаняна [9Т,10Т и др.] посвященных разработке численно-аналитической методики определения коэффициентов молярного переноса пара и массопроводности в неизотермических условиях с учетом режима и кинетики интенсивного обезвоживания, термодинамических параметров взаимодействия объекта сушки с водой, комплекса физико-химических свойств материала и др.

Разработанная И.Ю. Алексаняном [9,11] методика основана на 3 допущениях:

- в поверхностном слое материала, от центра и до периферии частицы продукта происходит линейная релаксация избыточного давления, при этом, чем ближе координата к поверхности частицы, тем меньшее сопротивление оказывает капиллярно-пористая система диффузии влаги к поверхности;
- избыточное давление соответствует температуре насыщения только для внутренних слоев, где не происходит резкой релаксации давления, что подтверждено опытным путем в работах П.Д. Лебедева [80,81].
- преимущественное значение градиента давления для диффузии влаги, не исключает возможность движения влаги (преимущественно в виде пара) под действием градиента температуры;

При построении математической модели распределения полей температур считаем, что распыленная частица имеет шарообразную форму, а, следовательно,

энергоподвод осуществляется равномерно по всей поверхности частицы. За координату – абсциссу x логично принять диаметр частицы.

В случае объемного энергоподвода дифференциальное уравнение переноса тепла при одномерной задаче имеет вид [85]:

$$c \cdot \rho(x, t, W) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, t, W) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \varepsilon \cdot r(x, t, W) \cdot \rho(x, t, W) \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} + W \cdot \dot{W}(x, t, W), \quad (5.1)$$

где x – координата глубины частицы, м;

$\lambda(x, t, W)$ – теплопроводность материала (см. гл. 2), Вт/(м·К);

$c \cdot \rho(x, t, W) = c_v$ – объемная теплоемкость материала (см. гл. 2), Дж/(К·м³);

$\rho(x, t, W)$ – плотность материала (см. гл. 2), кг/м³;

$r(x, t, W)$ – теплота испарения, Дж/кг – определенная при термодинамическом анализе механизма внутреннего массопереноса (см. гл. 2);

t – температура в любой пространственной точке материала, К;

$\varepsilon = 1$ – коэффициент фазовых превращений, так как влагоперенос в процессе высокоинтенсивной распылительной сушки происходит преимущественно в виде пара при изотропности структуры [9,11];

$\partial W / \partial \tau$ – скорость сушки, кг/(кг·с) – с учетом изотропности структуры [9,11], можно заменить на $\partial \bar{W} / \partial \tau$ – дифференциальное изменение средней по слою влажности;

$\dot{W}(x, t, W) = 0$ – внутренний источник тепла отсутствует.

Структура частиц высушиваемого материала изотропна и поле влажности равномерно по слою, а, следовательно, теплофизические характеристики практически не зависят от координаты x . Таким образом, если вынести $\bar{\lambda}(t, W)$ за знак дифференциала и разделить уравнение на $\bar{c}_\rho(t, W)$, то получим:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \bar{a}(t, W) \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r(t, W) \bar{\rho}(t, W)}{\bar{c}_\rho(t, W)} \cdot \frac{\partial \bar{W}}{\partial \tau}, \quad (5.2)$$

где $\bar{a}(t, W) = \frac{\bar{\lambda}(t, W)}{\bar{c}_\rho(t, W)}$ – коэффициент температуропроводности (см. гл. 2), м²/с.

После математических преобразований и далее опускаем знак среднего и варьируемого параметров выражение (5.2) принимает вид:

$$\frac{\partial t}{\partial W} = \frac{a}{\partial W / \partial \tau} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r \cdot \rho}{c_\rho}. \quad (5.3)$$

Решением уравнения (5.3) при краевых условиях является искомая функция $t = f(x, W)$.

В начальный момент времени $\tau = 0$, и соответственно при влажности продукта W_n , температура материала во всех пространственных точках частицы принимается одинаковой и соответствует $t_0 = T_{prod}$. Кроме того, T_{prod} задается и как фактор, влияющий на скорость и характер тепломассообменных процессов (см. гл. 4). То есть, начальные условия: $W = W_n$, $t = t_0$ и $t(x, W) = t_0$. При решении конечные условия предыдущего участка (распределение значений температур по диаметру частицы) являются начальными для последующего.

При моделировании пренебрегаем лучистым теплообменом между поверхностями распыленных частиц, так как фактически отражателем является внешняя поверхность соседних частиц продукта имеющих одинаковую температуру [9,11, 89,120].

Теплообмен на границе материала с сушильным агентом задается граничными условиями 2-го рода.

$$-\lambda(W) \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha(T_{c.a.} - t_{x=0(поверх)}), \quad (5.5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), $T_{c.a.}$ – температура сушильного агента (окружающей среды), К; $t_{x=0(поверх)}$ – температура поверхности частицы, К.

Чтобы оба аргумента, по которым ведется дифференцирование, возрастали в моделируемом процессе обезвоживания, при численной реализации модели заменим влажность W концентрацией сухих веществ c , учитывая формулу их связи $c = 1 - W$.

Уравнение относится к дифференциальным уравнениям параболического типа, для решения которых наиболее широко распространен фундаментальный метод конечных разностей. Согласно этому методу функции, заданные на континууме, представляются сеточным вектором, а дифференциальные операторы естественным образом аппроксимируются на сетке их разностными аналогами [55,122].

Вычислительная схема для решения одномерного уравнения параболического типа по неявной схеме реализуется следующим образом:

- 1) вычисляют значения $y_i^0 = \varphi(x_i, c_{нач})$; $i = 0, 1 \dots N$, где N – число разбиений по оси x ;
- 2) на каждом слое $k = 0, 1 \dots, N_0 - 1$, где N_0 – число разбиений по оси s , по методу прогонки [17] вычисляют значения прогоночных коэффициентов по рекуррентным формулам и значение y_i^{k+1} и затем все y_N^{k+1} , до тех пор, пока не сделано заданное число шагов по оси s , при этом граничное условие в точке $x = 0$ «перегоняется» в текущую точку $x = x_n$. Метод прогонки является частным случаем метода Гаусса при естественном порядке исключения неизвестных и применяется для решения систем уравнений, возникающих при аппроксимации краевых задач [55].

Реализация математической модели тепломассопереноса при распылительной сушке яичных продуктов выполнена в среде программного обеспечения Mathcad Professional (см. Приложения 3 – 8) и позволила получить при рациональных и комбинированных режимах (установленных в гл. 3, 4) поля распределения температур по диаметру частицы продукта в зависимости от концентрации сухих веществ. В графическом виде поля температур представлены на рисунках 5.1 – 5.6.

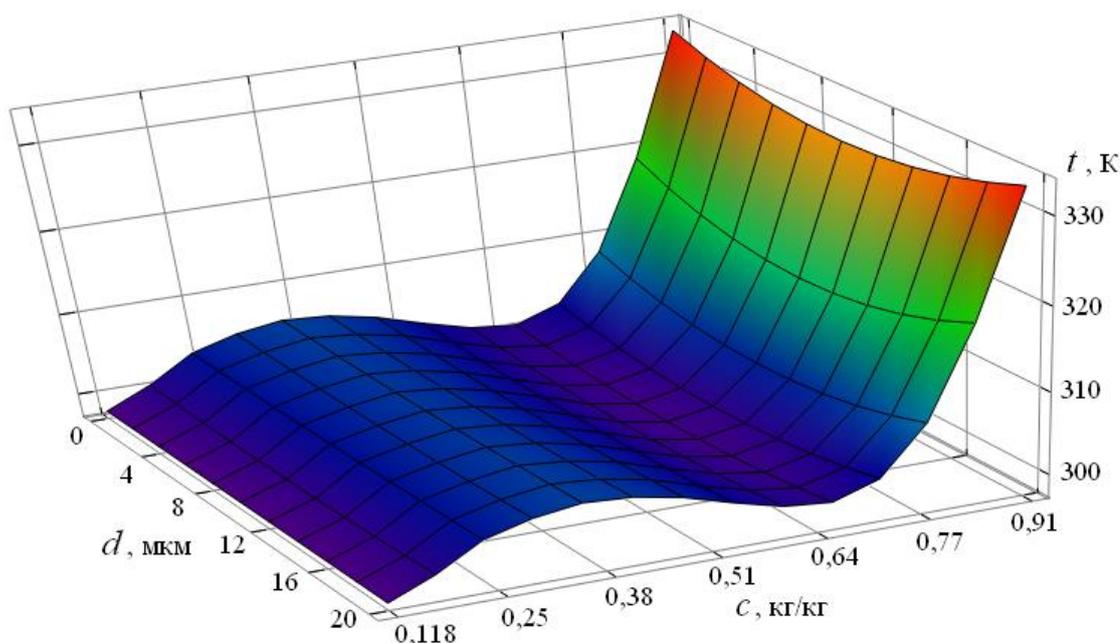


Рисунок 5.1 - Поле распределения температур по диаметру частицы яичного белка в процессе распылительной сушки (режимные параметры: $T_{прод} = 298\text{K}$; $T_{с.а.} = 473\text{K}$; прямоток)

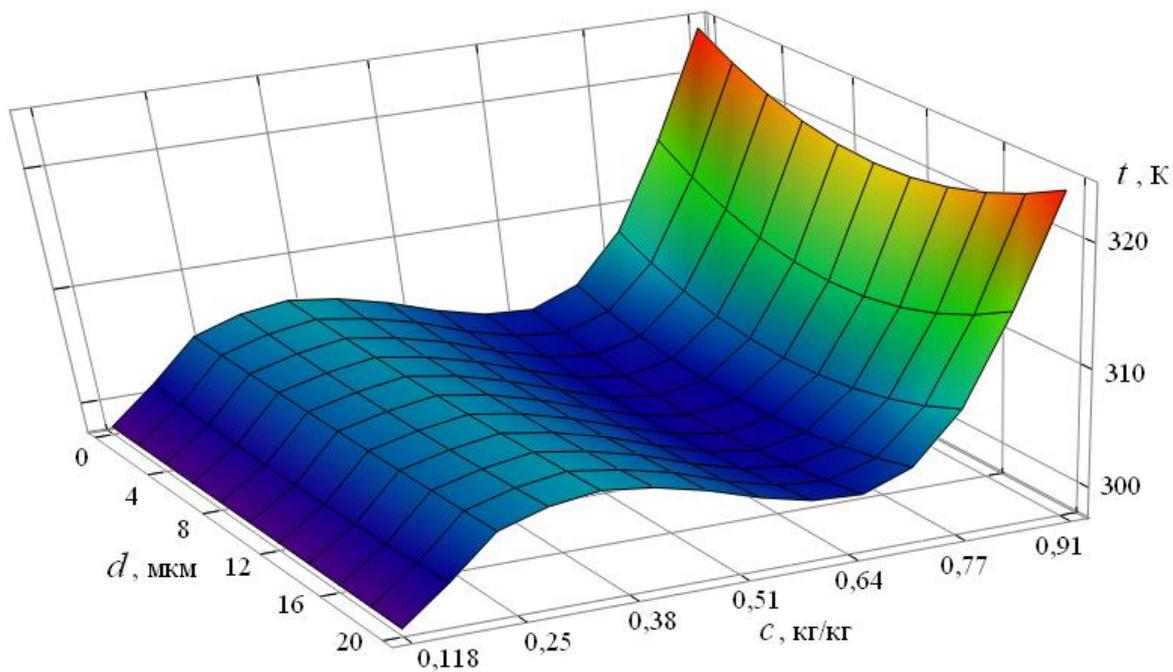


Рисунок 5.2 - Поле распределения температур по диаметру частицы яичного белка в процессе распылительной сушки (режимные параметры: $T_{prod} = 298\text{K}$; $T_{c.a.} = 473\text{K}$; прямоток – перекрестный ток)

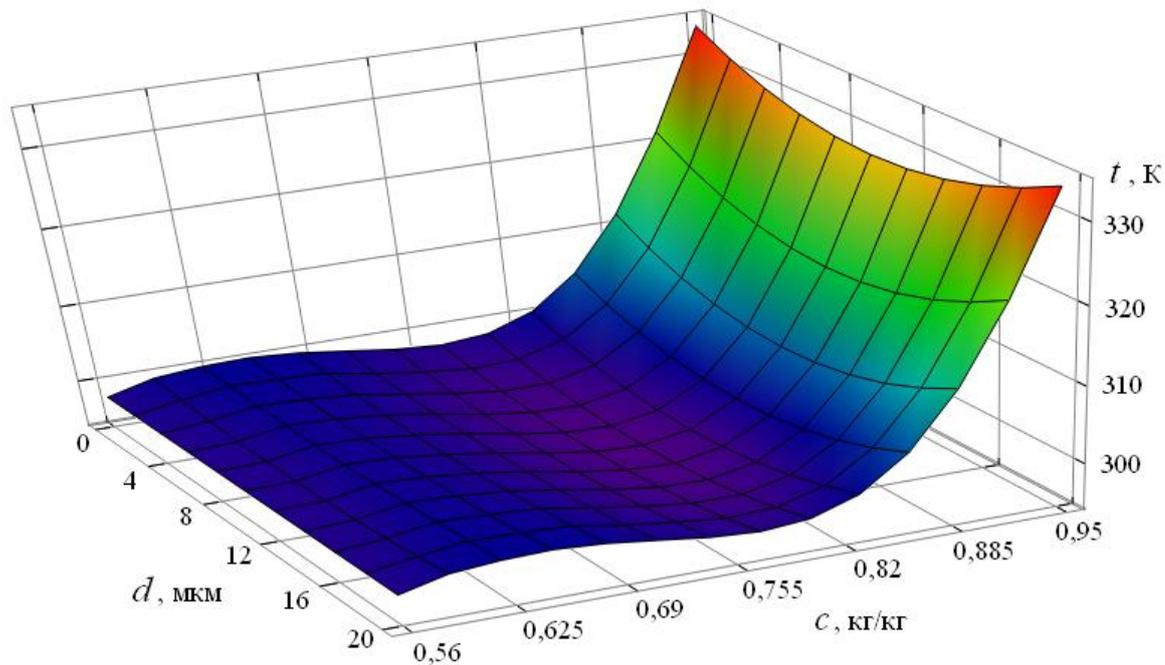


Рисунок 5.3 - Поле распределения температур по диаметру частицы яичного желтка в процессе распылительной сушки (режимные параметры: $T_{prod} = 298\text{K}$; $T_{c.a.} = 473\text{K}$; прямоток)

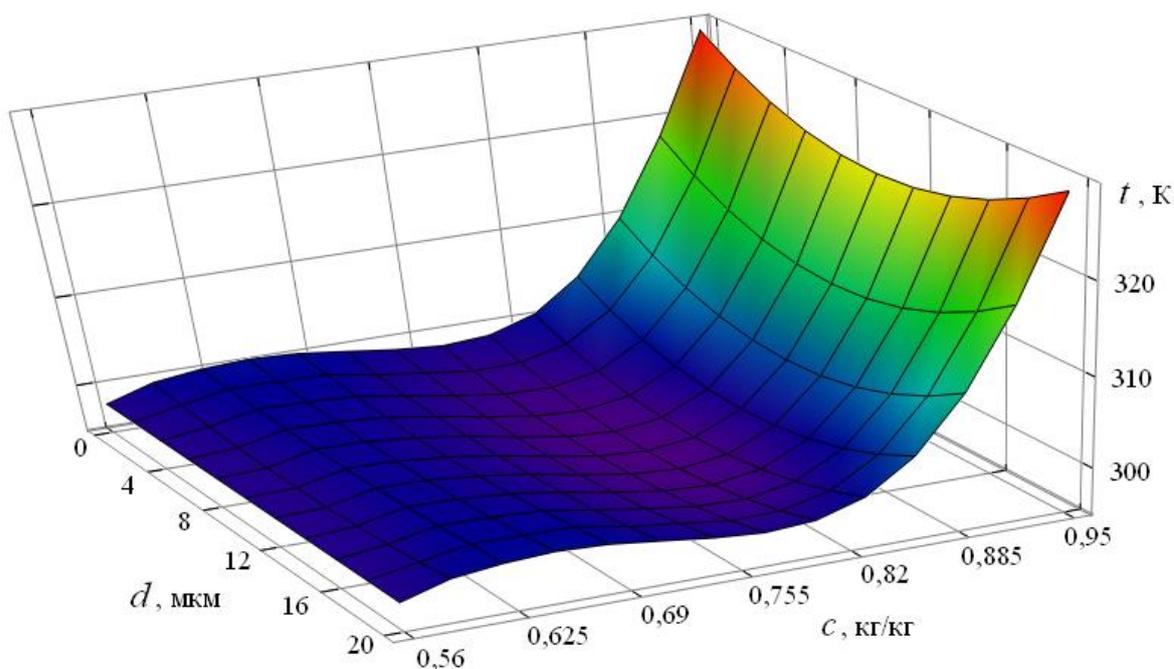


Рисунок 5.4 - Поле распределения температур по диаметру частицы яичного желтка в процессе распылительной сушки (режимные параметры: $T_{prod} = 298\text{K}$; $T_{c.a.} = 473\text{K}$; прямоток – перекрестный ток)

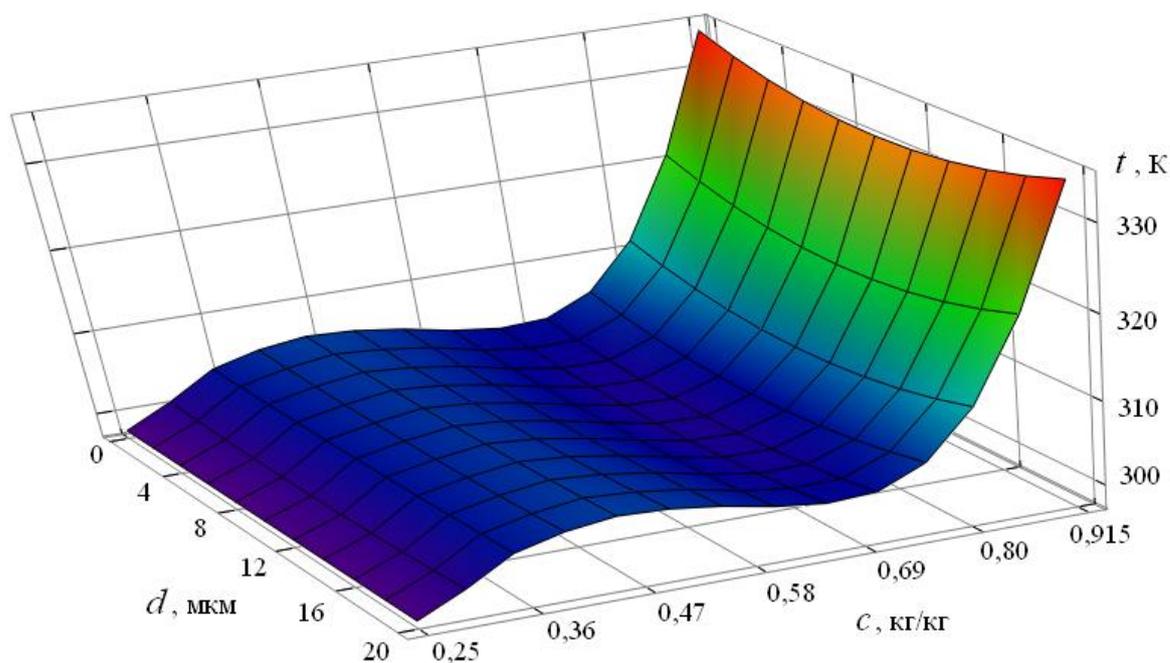


Рисунок 5.5 - Поле распределения температур по диаметру частицы яичного меланжа в процессе распылительной сушки (режимные параметры: $T_{prod} = 298\text{K}$; $T_{c.a.} = 458\text{K}$; прямоток)

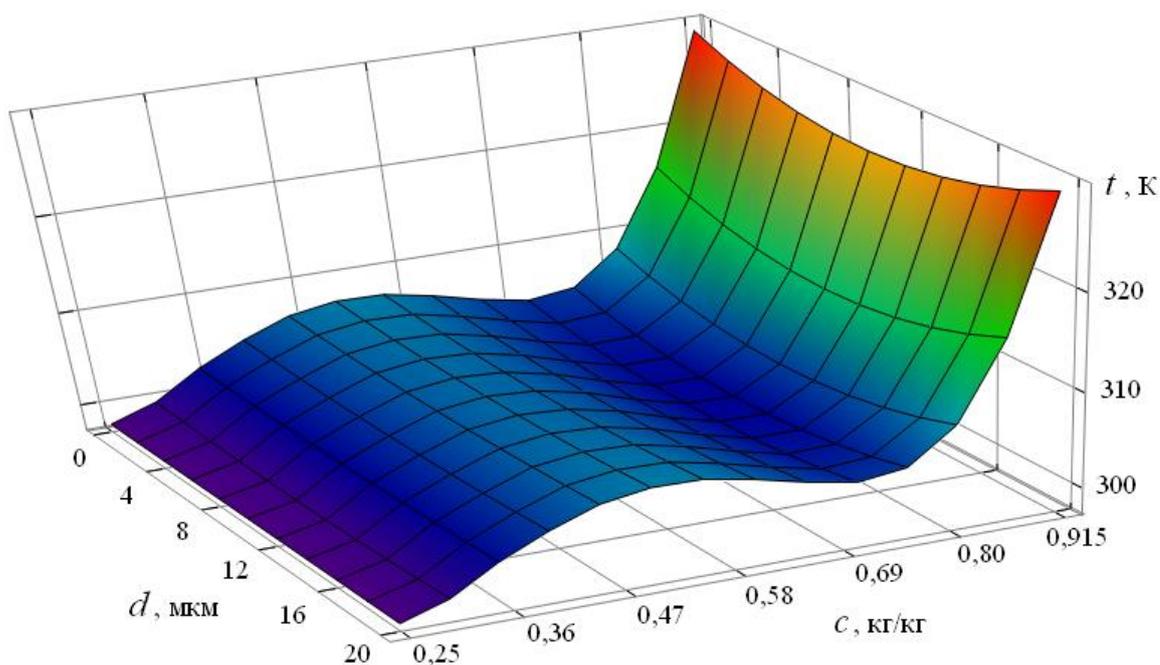


Рисунок 5.6 - Поле распределения температур по диаметру частицы яичного меланжа в процессе распылительной сушки (режимные параметры: $T_{\text{прод}} = 298\text{K}$; $T_{\text{с.а.}} = 458\text{K}$; прямоток – перекрестный ток)

Оценить адекватность модели можно ориентировочно по температуре поверхности частицы, которая измерялась в конце процесса сушки экспериментально в слое порошка продукта при его конечной влажности. Отклонение расчетных данных и полученных экспериментально при различных режимах составило не более 10%.

Анализ полей распределения температур (рисунок 5.1 – 5.6) по диаметру частиц яичных продуктов и численные значения температур в пространственных точках частиц (см. Приложения 3 – 8) в процессе распылительной сушки позволяют сделать вывод о незначительных температурных перепадах в материале в ходе обезвоживания. На первоначальной стадии прогрева температура по диаметру частиц повышается, а в период интенсивного удаления свободной влаги в области максимальных значений скорости сушки (рисунок 4.8, 4.9 и 4.12) материал практически не нагревается, а, следовательно, все тепло от сушильного агента, сообщаемое материалу, полезно расходуется на испарение влаги. Этот факт обоснован еще в классических работах по сушке [44,85 и др.].

Далее наблюдается стремительный рост температуры материала по мере увеличения содержания сухих веществ до максимальных значений температур в

конце процесса сушки (рисунок 5.1 – 5.6). Аналогичный характер изменения температуры наблюдается по всему сечению частицы. Рост температуры свидетельствует о переходе к удалению преимущественно адсорбционной влаги во втором периоде сушки. Прогрев материала интенсивней на поверхности частиц (рисунок 5.1 – 5.6), что свидетельствует об углублении зоны испарения вглубь частицы и подтверждает ранее сделанные выводы о механизме влагопереноса и согласуется с классическими работами по сушке [44,85 и др.].

Сравнение полей распределения температур при рациональных режимах для вариантов прямотока (рисунок 5.1, 5.3 и 5.5) и комбинации прямотока – перекрестного тока (рисунок 5.2, 5.4 и 5.6) свидетельствует о снижении температур в пространственных точках объектов сушки при создании более активной аэродинамической обстановки взаимодействия потоков. Снижение температур материала в результате 2-х зонной сушки при комбинации прямотока – перекрестного тока обуславливает более высокое качество получаемых порошков яичных продуктов. Таким образом, организация рациональной 2-х зонной сушки для яичных продуктов позволяет не только увеличить удельную производительность сушки (см. главы 3, 4), но и повысить качественные показатели товарных продуктов.

Средние по сечению материала значения температур яичных продуктов не превышали рекомендованных 333 К, что обуславливает сохранность качества при сушке, а, следовательно, разработанные режимы могут быть рекомендованы для внедрения в производственную практику.

На основе предложенной модели тепломассопереноса можно разработать программное обеспечение для программно-аппаратных комплексов с целью контроля параметров и управления режимами при распылительной сушке.

ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ И ПРОЕКТНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

6.1 Алгоритм разработки комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки

Алгоритм получения комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки предусматривает следующие этапы:

1) В ходе комплекса экспериментов получить данные по кинетике процесса и построить кривые сушки при различном сочетании влияющих параметров. По кривым сушки определить время сушки продукта до требуемой конечной влажности.

2) Определить целевую функцию – удельную производительность установки и получить ее зависимость от влияющих факторов. Определить максимум целевой функции и соответствующие ему рациональные значения варьируемых факторов.

3) Представить экспериментальные данные по рациональному режиму в виде кривой зависимости времени сушки от влажности (или содержания сухих веществ). Произвести аппроксимацию кривой зависимости времени сушки от влажности (или содержания сухих веществ) с учетом влияющих факторов и принимая во внимание изменения комплекса физико-химических свойств продукта (Глава 2, 3).

4) Получить зависимость скорости распылительной сушки от влияющих факторов дифференцированием зависимости времени сушки от влажности (или содержания сухих веществ). Определить максимум скорости сушки и соответствующее ему значение влажности (содержание сухих веществ), которое принимается за границу зон.

5) С помощью зависимости времени сушки от влажности (или содержания сухих веществ) определить продолжительность первого периода процесса влагоудаления и далее с учетом удельной производительности, расхода сушильного агента рассчитать рабочий объема и высоту сушильной камеры для организации первой зоны прямоочной распылительной сушки. Определить объем

и высоту рабочей камеры для второй зоны сушки. Определить соотношение расходов сушильного агента для зон.

6) Реализовать 2-х зонную распылительную сушку: 1 зона – прямоточный контакт продукта и сушильного агента и 2 зона (период падающей скорости сушки) – дополнительная перекрестная подача сушильного агента.

7) Провести тестирование установленного рационального режима и уточнить время сушки и удельную производительность установки.

Реализация предложенных мероприятий позволяет при соответствующей модернизации распылительной сушильной техники увеличить производительность и термический коэффициент полезного действия установок без дополнительных энергетических затрат. Кроме того, перспективным представляется разработка распылительных сушилок для 2-х зонной сушки для практической реализации нестационарных аэродинамических режимов при сушке.

6.2 Распылительная сушилка для комбинирования рациональных режимов

Предложенная распылительная сушилка (рисунок 6.1) относится к технике сушки жидких и пастообразных продуктов и может быть использована при производстве сухих дисперсных материалов, в частности для сушки яичных продуктов. Конструкция сушилки позволяет организовать равномерную, по высоте сушильной камеры, подачу сушильного агента и увеличить время пребывания распыленных частиц продукта в сушильной камере, а также исключить контакт частиц продукта со стенками сушильной камеры.

На рисунке 6.1 представлена предлагаемая сушилка. Сушильная камера 12 составлена из трех составных частей: верхняя часть сушильной камеры 5 соединена с цилиндрической частью сушильной камеры 4, к которой присоединена нижняя коническая часть сушильной камеры 2. Верхняя часть сушильной камеры 5 оснащена верхним патрубком ввода сушильного агента 6 и распылителем 7. Цилиндрическая часть сушильной камеры 4 имеет патрубок ввода сушильного агента по касательной к окружности цилиндрической части сушильной камеры 8. К нижней конической части сушильной камеры 2 присоединен узел выгрузки сухого продукта 1. В полости нижней конической части сушильной камеры 2 установлена

система отсоса 3, соединенная с циклоном 9 и сборником сухого продукта 10. Вертикальные прямоугольные перегородки 11 жестко закреплены на внутренней поверхности цилиндрической части 4 сушильной камеры 12 при помощи стержневых крепежных элементов 13. По высоте каждая перегородка 11 имеет по два крепежных элемента 13 для придания жесткости конструкции.

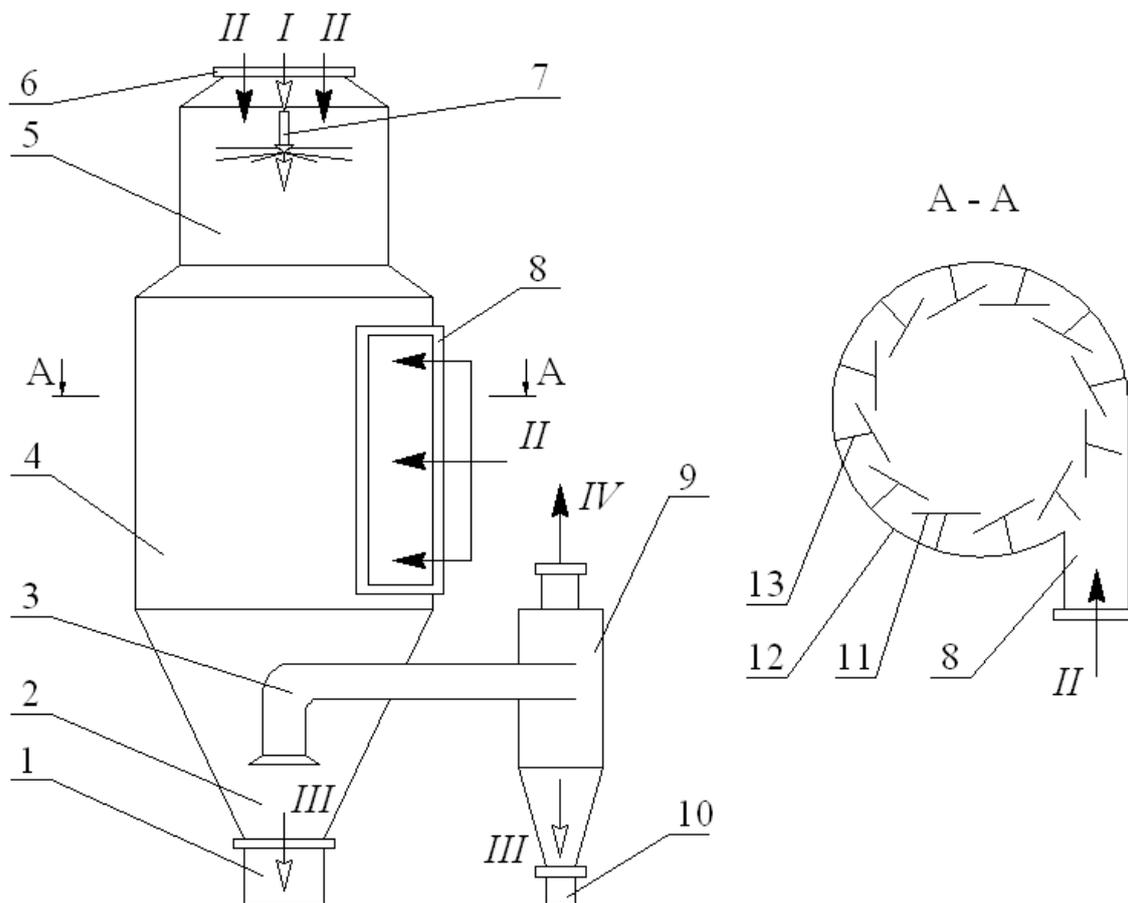


Рисунок 6.1 - Распылительная сушилка.

- 1 – узел выгрузки сухого продукта; 2 – нижняя коническая часть сушильной камеры; 3 – система отсоса; 4 – цилиндрическая часть сушильной камеры; 5 – верхняя часть сушильной камеры; 6 – верхний патрубок ввода сушильного агента; 7 – распылитель; 8 – патрубок ввода сушильного агента; 9 – циклон; 10 – сборник сухого продукта; 11 – вертикальные прямоугольные перегородки; 12 – сушильная камера; 13 – стержневой крепежный элемент

Устройство работает следующим образом. Продукт, подвергаемый сушке (поток I) диспергируется распылителем 7 в объем цилиндрической части 4 сушильной камеры 12. Ввод сушильного агента (поток II) осуществляется по патрубкам 6 и 8 установленных соответственно в верхней части 5 и

цилиндрической части 4 сушильной камеры 12. Благодаря вводу сушильного агента через патрубок 8 по касательной к окружности цилиндрической части 4 и наличию в ней вертикальных прямоугольных перегородок 11, осуществляется равномерная подача сушильного агента по высоте камеры между перегородками, при этом распыленные частицы продукта, увлекаемые потоками теплоносителя, начинают вращаться относительно оси камеры и совершают движения по нисходящей спиралевидной траектории.

Перегородки 11 установлены вертикально и выполнены одинаковыми по высоте с цилиндрической частью сушильной камеры 4 для равномерного подвода сушильного агента по всей траектории движения высушиваемого материала в зоне сушки и выравнивания температуры сушильного агента по высоте сушильной камеры, в результате чего достигается увеличение интенсивности процесса сушки.

Сушильный агент, проходя через пространство между перегородками 11, разделяется на несколько перекрещивающихся потоков, которые отталкивают распыленные частицы от поверхности перегородок и, следовательно, от стенок сушильной камеры. Перекрещивающиеся потоки сушильного агента компенсируют центробежную силу, действующую на частицы в процессе их спиралевидного движения. Таким образом, исключается контакт частиц продукта со стенками сушильной камеры и увеличивается интенсивность процесса сушки.

Распыленные частицы продукта при контакте с сушильным агентом высыхают и далее транспортируются потоком теплоносителя по системе отсоса 3 конической части 2 в циклон 9, где за счет возникающей центробежной силы происходит отделение отработавшего сушильного агента (поток IV) от сухого продукта (поток III), который накапливается в сборнике сухого продукта 10. Крупные частицы сухого продукта, не увлекаемые в систему отсоса 3, накапливаются в узле выгрузки 1 (поток III). Дополнительный ввод сушильного агента через патрубок 8 позволяет выровнять температуру сушки по высоте сушильной камеры и обуславливает более интенсивное обтекание частиц сушильным агентом, что значительно интенсифицирует процесс сушки.

Соотношение расходов сушильного агента подводимого через патрубки и количество перегородок зависят от ряда факторов: производительность установки, параметры факела распыла, время сушки, геометрические характеристики

сушильной камеры и др. Спиралевидная траектория движения частиц определяет большее время контакта продукта с сушильным агентом в камере по сравнению с традиционным прямолинейным движением вниз, что позволяет либо уменьшить высоту сушильной камеры при заданной производительности, либо увеличить интенсивность процесса и производительность установки.

Установка (рисунок 6.1) позволяет организовать 2-х зонную распылительную сушку: 1 зона – прямочный контакт продукта и сушильного агента и 2 зона (период падающей скорости сушки) – дополнительная перекрестная подача сушильного агента. Положительный эффект предлагаемого устройства обеспечивается за счет усовершенствования конструкции сушилки. Данное устройство позволяет увеличить интенсивность процесса сушки и повысить качество готового продукта.

6.3 Распылительная сушилка

Совместно с сотрудниками кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет» предложена распылительная сушилка (рисунок 6.2).

Сушилка (рисунок 6.2) предназначена для наиболее равномерного распределения сушильного агента по высоте сушильной камеры по сравнению с конструкцией на рисунке 6.1 и полностью исключает контакт распыленных частиц продукта со стенками сушильной камеры.

Конструкция сушилки позволяет организовать вращательное относительно оси камеры движение распыленных частиц по нисходящей спиралевидной траектории по всей высоте рабочей камеры, что способствует более активному взаимодействию потоков. Принцип действия установки аналогичен рассмотренному в п. 6.2 принципу действия установки (рисунок 6.1).

Положительный эффект предлагаемого устройства обеспечивается за счет усовершенствования конструкции сушилки. Данное устройство позволяет увеличить интенсивность процесса сушки и повысить качество готового продукта.

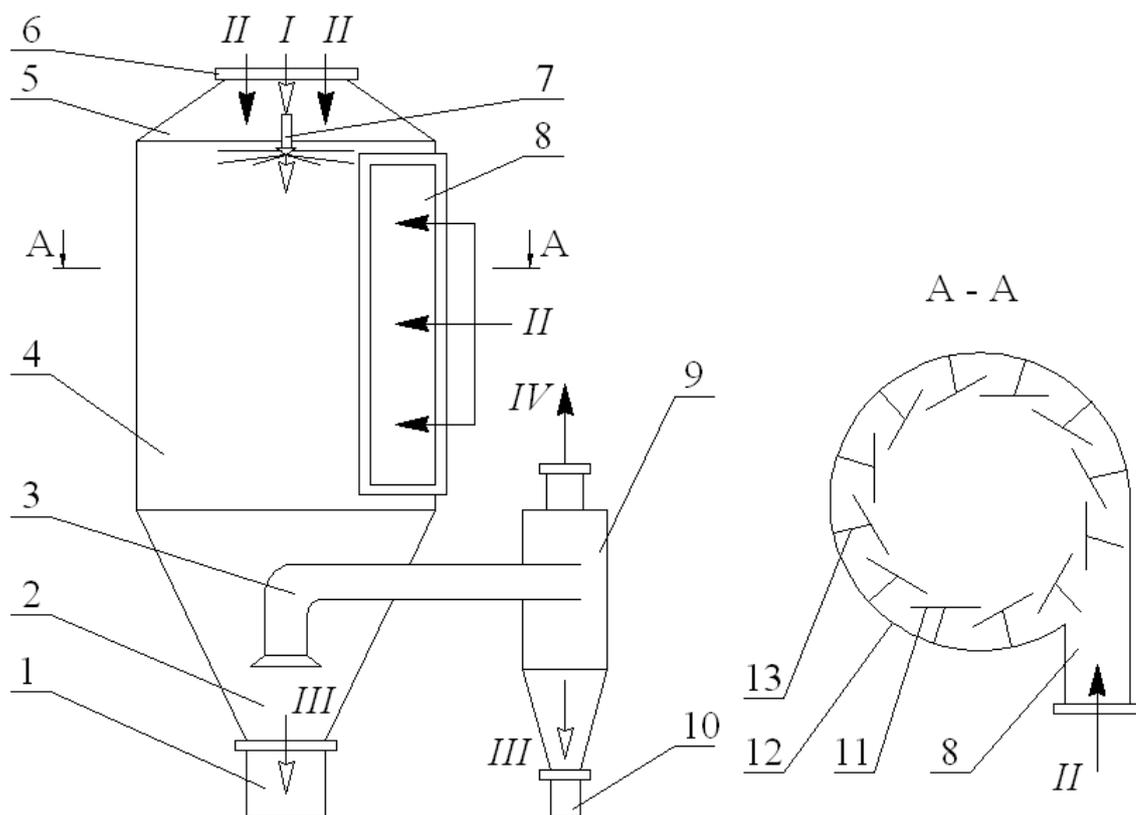


Рис. 6.2 - Распылительная сушилка.

- 1 – узел выгрузки сухого продукта; 2 – нижняя коническая часть сушильной камеры; 3 – система отсоса; 4 – цилиндрическая часть сушильной камеры; 5 – верхняя часть сушильной камеры; 6 – верхний патрубок ввода сушильного агента; 7 – распылитель; 8 – патрубок ввода сушильного агента; 9 – циклон; 10 – сборник сухого продукта; 11 – вертикальные прямоугольные перегородки; 12 – сушильная камера; 13 – стержневой крепежный элемент

Сушилка может быть рекомендована для трудносохнущих высоковязких термолабильных материалов.

6.4 Рекомендации по практическому использованию результатов исследований

Полученные функциональные зависимости теплофизических, структурно-механических и гигроскопических характеристик яичных продуктов от влажности и температуры продуктов для реальных диапазонов их изменения в процессе сушки могут быть использованы в инженерной практике, при расчете и проектировании технологического оборудования, а также для научного анализа

кинетики и динамики тепломассообменных процессов, их моделирования и оптимизации с целью энерго- и ресурсосбережения при переработке яичных продуктов.

На основе анализа процесса сорбции паров воды яичными продуктами, рекомендованы влажности продуктов достигаемые при сушке для последующего длительного хранения. Кроме того, данные по гигроскопическим характеристикам яичных продуктов целесообразно использовать для разработки рекомендаций по организации технологических стадий по переработке, фасовке, упаковке, транспортировке и хранению с учетом относительной влажности воздуха рабочих и складских зон.

Результаты комплексного исследования распылительной сушки яичных продуктов позволяет реализовать математическую постановку и решать задачи совершенствования и рационализации сушильного процесса. Разработаны рекомендации по организации экономически целесообразных режимов сушильного процесса для обеспечения наибольшей удельной производительности при минимальной потере качества продукции. Полученные функциональные зависимости удельной производительности сушилки и скорости процесса от влияющих факторов могут быть использованы при проектировании сушильной техники и организации пуск/наладочных работ по вводу в эксплуатацию промышленных сушилок на предприятиях.

Разработаны и рекомендованы к внедрению рациональные режимы сушки яичных продуктов. Предложена 2-х зонная рационализация распылительной сушки при комбинации прямого тока, на создание которого расходуется $2/3$ потока сушильного агента и дополнительной перекрестной подачи $1/3$ общего расхода сушильного агента в периоде падающей скорости сушки. В сравнении с традиционным прямоточным контактом, предложенная организация процесса позволяет увеличить удельную производительность сушилок и обеспечить качественные показатели готовой продукции за счет смягчения режима термического воздействия.

Рекомендованные рациональные режимы обезвоживания яичных продуктов позволяют использовать типовые конструкции распылительных сушильных установок.

Разработана математическая модель тепломассопереноса для расчета температур в течение процесса сушки в каждой пространственной точке объекта обезвоживания с целью управления качеством продукции при реализации различных температурных режимов при сушке. На основе предложенной модели тепломассопереноса можно разработать программное обеспечение для программно-аппаратных комплексов с целью контроля параметров и управления режимами при распылительной сушке.

Разработан алгоритм получения комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки. Реализация предложенных мероприятий позволяет при соответствующей модернизации распылительной сушильной техники увеличить производительность и термический коэффициент полезного действия установок без дополнительных энергетических затрат.

Предложены конструкции распылительных установок для сушки жидких и пастообразных продуктов, которые могут быть использованы при производстве сухих дисперсных материалов, в частности для сушки яичных продуктов. Конструкции сушилок позволяют организовать равномерную, по высоте сушильной камеры, подачу сушильного агента и увеличить время пребывания распыленных частиц продукта в сушильной камере, а также исключить контакт частиц продукта со стенками сушильной камеры. Положительный эффект предлагаемых устройств обеспечивается за счет усовершенствования конструкции сушилки и позволяют увеличить интенсивность процесса сушки и повысить качество готового продукта.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

- Определены перспективные направления совершенствования теплообмена при сушке яичных продуктов на основе анализа способов сушки и конструкторских решений для их осуществления с учетом энергетических затрат, интенсивности процесса и требований к сырью и качеству готового продукта.

- Исследованы статика процесса обезвоживания и свойства яичных продуктов как объектов сушки. Исследован механизм и термодинамические закономерности взаимодействия яичных продуктов с водой. Рекомендованы конечные влажности продуктов, достигаемые при сушке для последующего длительного хранения. Дана оценка видам и энергии связи влаги с материалом. Проведено обобщение и систематизация данных литературных источников по теплофизическим и структурно-механическим характеристикам яичных продуктов. Проведены экспериментальные исследования и определены значения плотности и теплопроводности яичных продуктов для реальных диапазонов изменения влажности и температуры в процессе сушки.

- Получены функциональные зависимости теплофизических, структурно-механических и гигроскопических характеристик яичных продуктов от влажности и температуры продуктов для реальных диапазонов их изменения в процессе сушки. Функциональные зависимости могут быть использованы в инженерной практике, при расчете и проектировании технологического оборудования, а также для научного анализа кинетики и динамики теплообменных процессов, их моделирования и оптимизации.

- Изучен механизм внутреннего теплопереноса при сушке яичных продуктов на основе исследования кинетики сушки. Установлено, что в отличие от обезвоживания твердых капиллярно-пористых структур при сушке распылением имеется ряд специфических особенностей ввиду того, что сушка жидких продуктов происходит интенсивно в каплях малых размеров.

- Реализована математическая постановка и решена задача совершенствования и рационализации сушильного процесса. Разработаны рекомендации по организации экономически целесообразных режимов сушильного процесса для обеспечения наибольшей удельной производительности при

минимальной потере качества продукции. Экспериментально обоснованы рациональные способы обезвоживания яичных продуктов и дана оценка влиянию основных факторов на процесс сушки. Получены расчетные зависимости скорости влагоудаления и удельной производительности сушилки от влияющих факторов для их использования при проектировании сушилок и организации пуск/наладочных работ по вводу в эксплуатацию промышленных сушилок.

- Разработаны и рекомендованы к внедрению рациональные режимы сушки яичных продуктов. Предложена 2-х зонная рационализация распылительной сушки при комбинации прямого тока и дополнительной перекрестной подачи сушильного агента в периоде падающей скорости сушки. В сравнении с традиционным прямоточным контактом, предложенная организация процесса позволяет увеличить удельную производительность сушилок и обеспечить качественные показатели готовой продукции за счет смягчения режима термического воздействия. Рекомендованные рациональные режимы обезвоживания яичных продуктов позволяют использовать типовые конструкции распылительных сушильных установок. Внедрение разработанных режимов позволяет решать ряд задач при организации сушки яичных продуктов: повысить удельную производительность промышленных сушильных комплексов при сокращении времени процесса и уменьшении габаритов сушильной камеры; повысить показатели качества производимой продукции при сокращении термического воздействия на продукты; усовершенствовать конструкций действующих сушилок и др.

- Разработана математическая модель тепломассопереноса для расчета температур в течение процесса сушки в каждой пространственной точке объекта обезвоживания с целью управления качеством продукции при реализации различных температурных режимов при сушке. Сравнение полей распределения температур при рациональных режимах для вариантов прямого тока и комбинации прямого тока – перекрестного тока свидетельствует о снижении температур в пространственных точках объектов сушки при создании более активной аэродинамической обстановки взаимодействия потоков. Снижение температур материала в результате 2-х зонной сушки при комбинации прямого тока – перекрестного тока обуславливает более высокое качество получаемых порошков

яичных продуктов. Таким образом, организация рациональной 2-х зонной сушки для яичных продуктов позволяет не только увеличить удельную производительность сушки, но и повысить качественный показатель товарных продуктов. Средние по сечению материала значения температур яичных продуктов не превышали рекомендованных 333 К, что обуславливает сохранность качества при сушке, а, следовательно, разработанные режимы могут быть рекомендованы для внедрения в производственную практику.

- Разработан алгоритм получения комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки. Реализация предложенных мероприятий позволяет при соответствующей модернизации распылительной сушильной техники увеличить производительность и термический коэффициент полезного действия установок без дополнительных энергетических затрат.

- Предложены конструкции распылительных установок для сушки жидких и пастообразных продуктов, которые могут быть использованы при производстве сухих дисперсных материалов, в частности для сушки яичных продуктов. Конструкции сушилок позволяют организовать равномерную, по высоте сушильной камеры, подачу сушильного агента и увеличить время пребывания распыленных частиц продукта в сушильной камере, а также исключить контакт частиц продукта со стенками сушильной камеры. Положительный эффект предлагаемых устройств обеспечивается за счет усовершенствования конструкции сушилки и позволяют увеличить интенсивность процесса сушки и повысить качество готового продукта.

- разработаны рекомендации по практическому использованию результатов исследования.

Результаты и рекомендации, полученные в диссертационной работе на основе проведенных исследований, приняты к использованию и дальнейшему внедрению на предприятиях ООО «КАСПРОФИТ», ООО НПП «Золотое зернышко», ООО «АкваПрод», ООО НПП «пЕДант» и ООО «АСТРБИОПРОДУКТ», где были отмечены высокий научно-технический уровень и актуальность исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Агафонов, В.П.** Белок и желток яичные сухие с улучшенными функциональными качествами [Текст] / В.П. Агафонов, С.С. Кругалев, Т.П. Петрова, Л.И. Каренин // Птица и птицепродукты. 2006. - 3. - С. 48 - 50.
- 2. Агафонов, В.П.** Влияние параметров технологического процесса производства сухих яичных продуктов на величину их растворимости [Текст] / В.П. Агафонов, Т.Н. Петрова, С.С. Кругалев // Птица и птицепродукты. 2007. V26.-С. 55 -58.
- 3. Агафонов, В.П.** Научные основы повышения конкурентоспособности отечественных яичных продуктов [Текст] / В.П. Агафонов // Новое в технике и технологии переработки птицы и яиц. Сборник научных трудов. Выпуск 33.-М.: 2005. - 136 с.
- 4. Агафонов, В.П.** Влияние пастеризации на физико-химические показатели яичной массы [Текст] / В.П. Агафонов, Т.П. Петрова, С.С. Кругалев // Новое в технике и технологии переработки птицы и яиц. Сборник научных трудов. 2007. Выпуск 35. - С. 79 -82.
- 5. Агафонов, В.П.** Качество сухих яичных продуктов [Текст] / В.П. Агафонов, Т.П. Петрова, С.С. Кругалев // Кондитерское и хлебопекарное производство. -2008. №9. С. 3 -6
- 6. Агафонов, В.П.** К вопросу оценки потребительских свойств куриных яиц разной категории [Текст] / В.П. Агафонов, Т.П. Петрова, С.С. Кругалев // - М «Птица и птицепродукты» №2, 2012 с.: 12-17.
- 7. Алексанян, И.Ю.** Исследование кинетики и совершенствование процесса распылительной сушки меланжа [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, О.Е. Губа // Научно-теоретический журнал. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания, №3. Воронеж, 2014. С. 43-47.
- 8. Алексанян, И.Ю.** Математическое моделирование тепломассопереноса при распылительной сушке растительных экстрактов [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова // Вестник АГТУ. Научный журнал. Серия:

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА. 2013. №1 (Февраль). Астрахань: АГТУ, 2013. С. 9 – 13.

9. Алексанян, И.Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения [Текст] : автореф. дис. ... доктора техн. наук : 05.18.12 / Алексанян Игорь Юрьевич.– М. : МГУПБ, 2001. – 52 с.

10. Алексанян, И.Ю. Физико-математическая модель процесса комбинированной сушки продуктов в различном агрегатном состоянии и численно-аналитический метод расчета эволюции полей температур, давлений и определения коэффициентов теплопроводности и молярного переноса пара с учетом динамики обезвоживания на основе аппроксимации кривых кинетики сушки [Текст] / И.Ю. Алексанян // Труды второй Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005» : тез. докл.- М., 2005. – Т.1. - С. 175-179.

11. Алексанян, И.Ю. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: Монография [Текст] / И.Ю. Алексанян, А.А. Буйнов. – Астрахань: АГТУ, 2004. – 380 с.

12. Антипов, С.Т. Сушка пивной дробилки в аппарате с закрученным потоком фаз [Текст] / С. Т. Антипов, В. Е. Добромиров, А. В. Прибытков; Воронеж, гос. технол. акад. - Воронеж, 2005. -164 с.

13. Антипов, С.Т. Установки для пофракционной сушки дисперсных материалов [Текст] / С. Т. Антипов, А. В. Прибытков // Техника машиностроения. - 2001. - № 6. - С. 97-101

14. Базаров, В.Г. А. с. 266124 – Бюл. изобр., 1970, № 11, с.39.

15. Бакланов, К.В. Характеристика майонезов, представленных на московском рынке [Текст] // -М.: Масложировая промышленность, 2008, №2, с. 23 24.

16. Батурин, Л.К. Разработка системы оценки и характеристика качества жизни населения [Текст] // -М.: Интерсэп, 2004. 318 с.

17. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков ; под общ. ред. Н.И. Тихонова. – 3-е изд., перераб. и доп.- М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.- 632 с.: ил.

18. **Бессарабов, Б.Ф.** Птицеводство и технология производства яиц и мяса птиц [Текст] / Б.Ф. Бессарабов, Э.И. Бондарев, Т.А. Столяр // – СПб.: Издательство «Лань», 2005. – 352 с.
19. **Бессарабов, Б.Ф.** Птицеводство и технология производства яиц и мяса птицы [Текст] / Б.Ф. Бессарабов, Л.Д. Жаворонкова, Т.А. Столяр, А.В. Раецкий // - М: Колос, 1994. – 271 с.
20. **Бородин, В.А.** Распыливание жидкостей [Текст] / В.А. Бородин и др. // М., Машиностроение, 1967. 208 с.
21. **Бурминский, Э.П. и др.** А. с. 876179. – Бюл. изобр., 1981, № 40. С. 38.
22. **Брунауэр, С.** Адсорбция газов и паров [Текст] В 2-х т. Т. 1. Физическая адсорбция / С. Брунауэр; пер. с англ. под ред. М.Н. Дубинина.. - М.: Госиздат иностр. лит., 1948. – 784 с.
23. **Вешкурцев, П.А.** А. с. 895526. – Бюл. изобр., 1982, № 1. С. 23.
24. **Витман, Л.А.** Распыливание жидкости форсунками [Текст] / Л.А. Витман и др. // М., Госэнергоиздат, 1962. 264 с.
25. Вода в пищевых продуктах [Текст] / под ред. Р.Б. Дакуорта. – М: Пищевая промышленность, 1980. - 376 с.
26. **Выговский, Г.А.** А. с. 579028 / Г.А. Выговский, Ю.Ф. Хорошков // – Бюл. изобр., 1977, № 41. С. 39.
27. **Вязиков, Б.П.** А. с. 657858 / Б.П. Вязиков и др. // – Бюл. изобр., 1979, № 15.
28. **Галустов, В.С.** А. с. 531549 / В.С. Галустов и др. // – Бюл. изобр., 1976, № 38. С. 73.
29. **Галустов, В.С.** А. с. 611683 / В.С. Галустов и др. // – Бюл. изобр., 1978, № 23. С. 27.
30. **Галустов, В.С.** А. с. 673318 / В.С. Галустов и др. // – Бюл. изобр., 1979, № 26. С. 41.
31. **Галустов, В.С.** А. с. 770555 / В.С. Галустов и др. // – Бюл. изобр., 1980, № 36.
32. **Галустов, В.С.** А. с. 784933 / В.С. Галустов и др. // – Бюл. изобр., 1980, № 45.
33. **Галустов, В.С.** А. с. 856570 / В.С. Галустов и др. // – Бюл. изобр., 1981, № 31.

- 34. Галустов, В.С.** А. с. 876180 / В.С. Галустов и др. // – Бюл. изобр., 1981, № 40. С. 67.
- 35. Галустов, В.С.** А. с. 925413 / В.С. Галустов и др. // – Бюл. изобр., 1982, № 17. С. 39.
- 36. Галустов, В.С.** А. с. 621386 / В.С. Галустов, В.В. Шувалов // – Бюл. изобр., 1978, № 32.
- 37. Гамрекели, М.Н.** Использование теории турбулентных струй для прогнозирования аэродинамики распылительных камер и оптимизации теплотехнологических процессов [Текст] / М.Н. Гамрекели // Тр. 1-й международной научно-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». М.: МТАУ им. В.П. Горячкина, 2002. Т.4. С.164-171.
- 38. Гамрекели, М.Н.** Факторы ограничения и интенсификации тепломассообмена в зоне активного испарения распылительных сушильных камер [Текст] / М.Н. Гамрекели // Тр. 1-й международной научно-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». М.: МТАУ им. В.П. Горячкина, 2002. Т.4. С. 172-176.
- 39. Гаппаров, М.М.** Да будет пища твоя... [Текст] / М.М. Гаппаров // Экология и жизнь,- 2007, №7,- С.64.
- 40. Гинзбург, А.С.** Инфракрасная техника в пищевой промышленности [Текст] / А.С. Гинзбург. - М.: Пищевая промышленность, 1966. - 408 с.
- 41. Гинзбург, А.С.** Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов [Текст] / А.С. Гинзбург, И.М. Савина. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 280 с.
- 42. Гинзбург, А.С.** Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов [Текст] / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 272 с.
- 43. Гинзбург, А.С.** Основные аэродинамические и структурные характеристики псевдооживленного слоя зерна [Текст] / А.С. Гинзбург, В.А. Резчиков // Инженерно-физический журнал. – 1965. - Т. 5, № 5. - С. 55.
- 44. Гинзбург, А.С.** Основы теории и техники сушки пищевых продуктов [Текст] / А.С. Гинзбург. - М.: Пищевая промышленность, 1975. - 527 с.

- 45. Голохвастова, С.Л.** Куриные яйца «Омега - 3» на страже здоровья [Текст] / С.Л. Голохвастова // Сельскохозяйственные вести. -2003. - №2. - С 9.
- 46. Грачева, И.М.** Технология ферментных препаратов [Текст] / И.М. Грачева, Л.Ю. Кривова – М.: 2000.-124с.
- 47. Губа, О.Е.** Термодинамический анализ закономерностей взаимодействия яичного порошка с водой [Текст] / О.Е. Губа, Н.А. Подледнева, Ю.А. Максименко // Международная отраслевая научная конференция профессорско-преподавательского состава Астраханского государственного технического университета, посвященная 80-летию основания Астраханского государственного технического университета – АГТУ (54 ППС): тез. докл/ под общей редакцией проф. Н.Т. Берберовой, проф. А.В. Котельникова; Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2010. Т II. С. 74-75.
- 48. Губа, О.Е.** Разработка рациональных способов конвективной сушки для жидких продуктов [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко, С.А Терешонков // Журнал. Пищевая промышленность. № 10. Москва: Издательство «Пищевая промышленность», 2010 г. С. 24 – 25. По перечню ВАК РФ.
- 49. Губа, О.Е.** Термодинамика внутреннего массопереноса при взаимодействии яичного порошка с водой [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко, И.Ю. Алексанян // Четвертая Международная научно – практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011», Том 1. Москва: ФГОУ ВПО «МГАУ», 2011. С.478-482.
- 50. Губа, О.Е.** Термодинамический анализ внутреннего массопереноса при взаимодействии яичного порошка с водой [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А.Максименко // Вестник АГТУ. Научный журнал. 2011. № 2(52). Астрахань: АГТУ, 2011. С. 37 – 40.
- 51. Губа, О.Е.** Исследование статики процесса сушки яичного меланжа [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко, И.Ю. Алексанян // Всероссийская научная конференция профессорско-преподавательского состава Астраханского государственного технического университета (56 ППС): тез. докл. [Электронный ресурс] / под общей редакцией проф. Н.Т. Берберовой, проф. А.В. Котельникова; Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2012. Режим доступа: 1 CD-диск. – № гос. регистрации 0321202044.

- 52. Губа, О.Е.** Термодинамический анализ закономерностей взаимодействия яичного порошка с водой/ О.Е. Губа, Ю.А. Максименко, Т.Г. Васильева, Э.П. Дяченко // Теоретический журнал «Хранение и переработка сельхозсырья», № 1. Москва: Издательство «Пищевая промышленность», 2012 г. С.8-9. По перечню ВАК РФ.
- 53. Губа, О.Е.** Исследование кинетики распылительной сушки меланжа с учетом влияния основных факторов на интенсивность теплообмена [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко // Журнал. Естественные и технические науки, №7(75). Москва: Издательство «Спутник+», 2014. С. 72 – 74. По перечню ВАК РФ.
- 54. Губа, О.Е.** Исследование кинетики процесса распылительной сушки меланжа [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ. Научный журнал. №2 (58) ноябрь. Астрахань: АГТУ, 2014. С. 92–96.
- 55. Гутер, Р.С.** Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта [Текст] / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1970. – 428 с.
- 56. Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия [Текст] / А.А. Гухман. – М.: Высшая школа, 1973. – 295 с.
- 57. Гухман, А.А.** Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена [Текст] / А.А. Гухман. – М.: Высшая школа, 1974. – 328 с.
- 58. Дитякин, Ю.Ф.** Распыливание жидкостей [Текст] / Ю.Ф. Дитякин и др. // М., Машиностроение, 1977. 208 с.
- 59. Долгорукова, Л.М.** Морфология и биохимический состав яиц мясных кур разного возраста [Текст] / Л. М. Долгорукова // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. - 2006. - № 5. - С. 43-46.
- 60. Ересько, А.Ф.** А. с. 835504 / А.Ф. Ересько и др. // – Бюл. изобр., 1961, № 21. С.65.
- 61. Заварин, Н.Д.** А. с. 567505 / Н.Д. Заварин и др. // – Бюл. изобр., 1977, № 29. С. 56.
- 62. Заварин, Н.Д.** А. с. 584897 / Н.Д. Заварин и др. // – Бюл. изобр., 1977, № 47. С. 54.
- 63. Заварин, Н.Д.** А. с. 706132 / Н.Д. Заварин и др. // – Бюл. изобр., 1979, № 48. С. 76.

- 64. Заварин, Н.Д.** А. с. 680766 / Н.Д. Заварин, В.С. Галустов // – Бюл. изобр., 1979, № 31. С. 69.
- 65. Ковалев, Н.С.** А. с. 322563 / Н.С. Ковалев, А.А. Попов // – Бюл. изобр., 1971, № 36. С.18.
- 66. Кутовой, В.А.** А. с. 343708 / В.А. Кутовой, В.М. Почивалин // – Бюл. изобр., 1972, № 21. С.17.
- 67. Кабалдин, Г.С.** Модернизация распылительных и барабанных сушильных установок: производственно-практическое издание [Текст] / Г.С. Кабалдин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 112 с.
- 68. Кац, З.А.** Сушка пищевых продуктов в виброкипящем слое [Текст] / З.А. Кац, А.П. Рысин. – М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1972. – 44 с.
- 69. Куц, П.С.** Обобщенное уравнение кинетики процесса конвективной сушки влажных материалов [Текст] / П.С. Куц, В.Я. Шкляр, А.И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. - 1987. - Т. 53, № 1. - С. 90-96.
- 70. Куцакова, В.Е.** Интенсификация тепло- и массообмена при сушке пищевых продуктов [Текст] / В.Е. Куцакова, А.Н. Богатырев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 236 с.
- 71. Куцакова, В.Е.** Динамика омывания частиц в вихревом слое [Текст] / В.Е. Куцакова, Л.И. Логинов, С.Ф. Демидов // ЖПХ. – 1979. - Т. 52, № 11. - С. 2519 — 2524.
- 72. Келкебек Кен.** Что такое «качество яиц» и как его сохранить? [Текст] / Кен Келкебек // Птица и птицепродукты. 2003. - 2. - С. 68 - 70
- 73. Ковалев, Ю.Л.** Глубокая переработка яиц на птицефабрике «Краснодарская» [Текст] / Ю.Л. Ковалев // Птица и птицепродукты. 2009. - № 4. - С. 62 -63.
- 74. Копеч, В.** Создание изолированных продуктов из яиц с высоким биологическим и функциональным значением [Текст] // М.: Информационный бюллетень «Масла и жиры», 2004, №1.
- 75. Кочиш, И.И.** Птицеводство [Текст] / И.И. Кочиш, М.Г. Петраш, С.Б. Смирнов //– М.: «Колос С», 2003. – 407 с.: ил.

- 76. Кравчик, Я.** Использование сухих яичных продуктов при производстве тортов [Текст] / И. Кравчик, Ж.Н. Гайдаенко // Кондитерское и хлебопекарное производство. - 2004. - №4. - С. 9-10.
- 77. Краснов, В.А.** Установка для определения коэффициента теплопроводности жидкостей [Текст] / В.А. Краснов // Геология, добыча, переработка и экология нефтяных и газовых месторождений. Научные труды Астраханьнипигаз. - Астрахань: ИПЦ «Факел» ООО «Астраханьгазпром», 2001. – С.254-256.
- 78. Кругалев, С.С.** Достижения и перспективы в области переработки яиц [Текст] / С.С. Кругалев, Т.Н. Петрова // Птица и птицепродукты. 2004. - № 6. - С. 28-31.
- 79. Кузнецова, Л.С.** Технология приготовления мучных кондитерских изделий [Текст] / Л.С. Кузнецова, М.Ю. Сиданова // - М.: Мастерство, 2005. - 350 с.
- 80. Лебедев, П.Д.** Расчет и проектирование сушильных установок [Текст] / П.Д. Лебедев // М.-Л. Госэнергоиздат, 1963. 320 с.
- 81. Лебедев, П.Д.** Высокотемпературная сушка материалов под действием внутреннего градиента давлений пара [Текст] / П.Д. Лебедев // Труды МЭИ. - 1958. – вып.30. - С. 169-178.
- 82. Ломтев, В.Л.** А. с. 718172 / В.Л. Ломтев и др. // – Бюл. изобр., 1980, №8. С. 46.
- 83. Луполова, Т.Г.** Полиморфизм жидких фракций яичного белка [Текст] / Т. Луполова, В. Райлян, В. Мачук // Птицефабрика. - 2006. - №10. - С. 19-20.
- 84. 79Т. Лыков, А.В.** Сушка в химической промышленности [Текст] / А.В. Лыков.-М.: Химия, 1970. - 499 с.
- 85. Лыков, А.В.** Теория сушки [Текст] / А.В. Лыков. - М.: Энергия, 1968. - 471 с.
- 86. Лыков, А.В.** Тепломассобмен [Текст] / А.В. Лыков. - М.: Энергия, 1978. - 478 с.
- 87. Лыков, А.В.** Тепло- и массообмен в процессах сушки [Текст] / А.В. Лыков. - М.: Гостоптехиздат, 1956. – 464 с.
- 88. Максименко, Ю.А.** Моделирование и совершенствование тепломассообменных процессов при конвективной сушке растительного сырья в диспергированном состоянии [Текст] / Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ.

Научный журнал. Серия: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА. 2013. №2 (Август). Астрахань: АГТУ, 2013. С. 19 – 24.

89. Максименко, Ю.А. Совершенствование тепломассообменных процессов при сушке кормовых дрожжей в диспергированном состоянии [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2005. 21 с.

90. Максименко, Ю.А. Сушильная установка для получения порошков из жидких продуктов [Текст] / Ю.А.Максименко, Н.А. Подледнева, О.Е. Губа // Вестник АГТУ. Научный журнал. 2011. № 2(52). Астрахань: АГТУ, 2011. С. 41 – 44.

91. Маламуд, Д.Б. Куриное яйцо. Перспективные технологии XXI века [Текст] / Д.Б. Маламуд, В.П. Агафонов // Птица и птицепродукты. - 2003. - № 2. - С.8 -10.

92. Мельник, Е.В. Разработка технологии мучных изделий профилактического назначения с использованием сухих яйцепродуктов [Текст]: автореф. дис. ...канд. техн. наук [Текст] / Е.В. Мельник - М.: 2009. - 26с.

93. Митрофанов, Н.С. Переработка птицы [Текст] / Н.С. Митрофанов, Ю.А. Плясов, Е.Г. Шумков и др. // - М.: Агропромиздат, 1990. - 303 с.

94. Михайленко, Г.Г. А. с. 835502 / Г.Г. Михайленко и др. // – Бюл. изобр., 1981, № 21.

95. Мойса, В.Ю. Гарантия качества пищевых продуктов: перспективы в Европе и США [Текст] / В.Ю. Мойса // Птица и ее переработка 2000. - № 2. - С. 39 – 42.

96. Никитина, Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах [Текст] / Л.М. Никитина. - М.: Энергия, 1968. - 500 с.

97. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф // Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248с.

98. Околелова, Т.Н. Функциональное яйцо плюс высокая продуктивность кур [Текст] / Т.Н. Околелова и др. // Птицеводство. - 2006. - 9. - С. 18-19.

99. Остриков, А.Н. Энергосберегающие технологии и оборудование для сушки пищевого сырья [Текст] / А.Н. Остриков, И.Т. Кретов, А.А. Шевцов // Воронеж: Воронежская государственная технологическая академия, 1998. - 344 с.

100. Пажи, Д.Г. А. с. 180522 / Д.Г. Пажи и др. // – Бюл. изобр., 1966, № 7.

101. Пажи, Д.Г. А. с. 182054 / Д.Г. Пажи и др. // – Бюл. изобр., 1966, № 10.

- 102. Пажи, Д.Г.** Распыливающие устройства в химической промышленности [Текст] / Д.Г. Пажи и др. // М., Химия, 1975. 200 с.
- 103. Пажи, Д.Г.** Форсунки в химической промышленности [Текст] / Д.Г. Пажи и др. // М., Химия, 1971. 224 с.
- 104. Пажи, Д.Г.** Основы техники распыливания жидкостей [Текст] / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов // – М.: Химия, 1984. 254 с.
- 105. Пажи, Д.Г.** Распылители жидкости [Текст] / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов // М., Химия, 1979. 216 с.
- 106. Пат. на полезную модель 120236РФ, МПК G01R1/067.** Зонд для определения коэффициента теплопроводности [Текст] / Краснов В.А., Лысова В.Н., Максименко Ю.А., Подледнева, Н.А., Пленкин А.В; Патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет» - 2012115153/28; Заявлено 16.04.2012. Оpubл. 10.09.2012, Бюл. № 25.
- 107. Пат. на полезную модель 126103РФ, МПК F26B17/10 (2006.01).** Аппарат для получения порошков из жидких продуктов [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко; Патентообладатель: И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко, Общество с ограниченной ответственностью «АСТРБИОПРОДУКТ»- 2012104262/06; Заявлено 07.02.2012. Оpubл. 20.03.2013, Бюл. № 8.
- 108. Пат. 2326316 Российская Федерация, МПК F26B17/10, МПК F26B3/092.** Сушилка с виброкипящим слоем [Текст] / О.С. Кочетов [и др.] ; заявитель и патентообладатель Кочетов О.С. - № 2006145287/06 ; заявл. 20.12.2006 ; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 16 (III ч.). – 1с.
- 109. Пат. 2250131 РФ, МПК B01J2/04, B01J2/16, B01D1/18.** Установка для распылительной сушилки и способ её применения [Текст] / Ойген Шварц, Гернот Мушль, Ханспетер Рютцлер, Жан-Марк Дютте; Патентообладатель: МЕРК ПАТЕНТ ГМБХ.- 2002100641/12; заявл. 06.06.2000; опубл. 20.04.2005.
- 110. Пат. 2326306 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01).** Установка для сушки растворов, суспензий и пастообразных материалов [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100036/06; заявл. 09.01.2007; опубл. 10.06.2008.

- 111. Пат. 2328669 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01).** Распылительная сушилка с инертной насадкой [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100040/06; заявл. 09.01.2007; опубл. 10.07.2008.
- 112. Пат. 2328676 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01).** Вихревая распылительная сушилка для дисперсных материалов [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100030/06; заявл. 09.01.2007; опубл. 10.07.2008.
- 113. Пат. 2329745 РФ, МПК A23L3/40 (2006.01).** Установка для вихревой распылительной сушки [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100033/13; заявл. 09.01.2007; опубл. 27.08.2008.
- 114. Пат. 2332624 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01).** Распылительная сушилка типа ВЗП с инертным носителем [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100039/06; заявл. 09.01.2007; опубл. 27.08.2008.
- 115. Пат. 2343375 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01).** Распылительная сушилка кипящего слоя с инертной насадкой [Текст] / О.С. Кочетов, М.В. Голубева, Л.В. Колаева, Е.О. Боброва, Е.В. Духанина, Н.И. Горнушкина, Д.О. Павлова; Патентообладатели: Кочетов Олег Савельевич, Голубева Мария Владимировна.- 2007124757/06; заявл. 03.07.2007; опубл. 10.01.2009.
- 116. Пат. 2377485 РФ, МПК F26B3/12.** Распылительная сушилка [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко, В.В. Ермолаев; Патентообладатель: Государственный комитет Российской Федерации по рыболовству, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГОУ ВПО «АГТУ»). – 2008145783/06; заявл. 19.11.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36.
- 117. Пат. на полезную модель 86718 РФ, МПК F26B5/04.** Сушильная установка для получения порошков из жидких продуктов [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко; Патентообладатель: Государственный комитет Российской Федерации по рыболовству, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Астраханский государственный технический университет» (ФГОУ ВПО «АГТУ»). – 2008143929/22; заявл. 05.11.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.

118. Пат. на полезную модель 84518 РФ, МПК F26B17/00. Установка для сушки дисперсных материалов / И.Ю. Алексанян, Л.М. Титова, Ю.А. Максименко, П.Н. Ларин; Патентообладатель: Федеральное агентство по рыболовству, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГОУ ВПО «АГТУ»). – 2008147611/22; заявл. 02.12.2008; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 19.

119. Панфилов, В.А. Технологические линии пищевых производств. Теория технологического потока [Текст] / В.А. Панфилов // -М.: Колос, 1993. -286 с.

120. Петровичев, О.А. Исследование тепломассообменных и гидромеханических процессов при распылительной сушке пектинового экстракта [Текст]: диссертация ... кандидата технических наук : 01.04.14 / Петровичев Олег Александрович; [Место защиты: Астрахан. гос. техн. ун-т].- Астрахань, 2007.- 172 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/5462.

121. Плановский, А.Н. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности [Текст] / А.Н. Плановский, В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. - М.: Химия, 1979. - 288 с.

122. Поттер, Д. Вычислительные методы в физике [Текст] / Д. Поттер ; пер. с англ. под ред. Ю.Н. Днестровского. – М.: Мир, 1975. – 386 с.

123. Ривкин, С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара [Текст] / С.Л. Ривкин, А.А. Александров // - М.: Энергия, 1980. - 424 с., ил.

124. Риза-Заде, Н.И. Продовольственный «Оскар» нашел своих лауреатов [Текст] / Н.И. Риза-Заде // Птица и птицепродукты. - 2008. - №2. - С. 14 -16.

125. Риза-Заде, Н.И. Демонстрация результатов реализации национального проекта «Развитие АПК» [Текст] / Н.И. Риза-Заде, М.Г. Горизонтова // Птица и птицепродукты. 2007. -№6.-С.10-12.

126. Рогов, И.А. Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов [Текст] / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. - М.: Пищевая промышленность, 1976. - 212 с.

- 127. Романков, П.Г.** Сушка во взвешенном состоянии [Текст] / П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская.– изд. 3-е, перераб. и доп. - Л.: Химия, 1979. – 272 с.- (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии).
- 128. Рудобашта, С.П.** Исследование кинетики процесса конвективной сушки с учетом массопроводности [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / Степан Павлович Рудобашта. - М.: МИХМ, 1967. - 136 с.
- 129. Рудобашта, С.П.** Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов [Текст] / С.П. Рудобашта // Известия Академии наук. Энергетика. - 2000. - № 4. - С. 98-109.
- 130. Рудобашта, С.П.** Зональный метод расчета кинетики процесса сушки [Текст] / С.П. Рудобашта, Э.Н. Очнев, А.Н. Плановский // Теоретические основы хим. технологии. - 1975. - Т. 9, № 2. - С. 185-192.
- 131. Рудобашта, С.П.** Фундаментальные исследования тепломассообмена при сушке [Текст] / С.П. Рудобашта // Труды второй Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005» :тез. докл.- М., 2005. – Т.2. - С. 7-17.
- 132. Сажин, Б.С.** Аппараты с активными гидродинамическими режимами для сушки дисперсных волокнообразующих полимеров [Текст] / Б.С. Сажин. – М.: изд. МТИ. – 1987, 43 с.
- 133. Сажин, Б.С.** Основы техники сушки [Текст] / Б.С. Сажин. - М.: Химия, 1984. – 320 с.
- 134. Сажин, Б.С.** Современные методы сушки [Текст] / Б.С. Сажин. – М.: Знание, 1973. – 64 с.
- 135. Сажин, Б.С.** Обзорная информация. Серия ХМ-1 [Текст] / Б.С. Сажин, Е.А. Чувпило.– М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1974. – 49 с.
- 152Т. Сушка пищевых растительных материалов [Текст] / [Г.К. Филоненко и др.] – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 439 с.
- 136. Саркисян, С.** Изменение аминокислотного состава яиц в процессе хранения [Текст] / С. Саркисян, В. Абрамян, Э. Мхчян // Птицеводство. - 2009. №4. - С. 39-40.

- 137. Семенов, Г.В.** Тепломассообмен в процессах низкотемпературного вакуумного обезвоживания термолабильных материалов и его аппаратурное оформление [Текст]: Дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12 / Семенов Геннадий Вячеславович: Москва, 2003 484с.
- 138. Скокан, Л.Е.** Оценка качества основных видов сырья используемых в кондитерском производстве, по микробиологическим показателям [Текст] / Л.Е. Скокан // М.: Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. 2000. №2.-с. 18-24.
- 139. Сметнев, С.И.** Птицеводство [Текст] / С.И. Сметнев // -М.: Колос, 1978. – 304 с.
- 140.** Термо- и влагометрия пищевых продуктов [Текст] / И.Б. Моик, Н.А. Рогов, А.В. Горбунов; под ред. И.А. Рогова. – М.: Агропромиздат, 1988. - 304 с.
- 141. Третьяков, Н.П.** Переработка продуктов птицеводства [Текст] / Н.П. Третьяков, Б.Ф. Бессарабов // – М.: Агропромиздат, 1985. – 287 с.
- 142. Хавкин, Ю.И.** Центробежные форсунки [Текст] / Ю.И. Хавкин // Л., Машиностроение, 1976. 168 с.
- 143. Чернышов, А.А.** А. с. 564869 / А.А. Чернышов и др. // – Бюл. изобр., 1977, № 26.
- 144. Чернышов, А.А.** А. с. 585884 / А.А. Чернышов и др. // – Бюл. изобр., 1978, № 48.
- 145. Чернышов, А.А.** А. с. 63838 3/ А.А. Чернышов и др. // – Бюл. изобр., 1978, № 47.
- 146. Чернышов, А.А.** А. с. 657858 / А.А. Чернышов и др. // – Бюл. изобр., 1979, № 15.
- 147. Чуфаровский, А.И.** А. с. 925405 / А.И. Чуфаровский и др. // – Бюл. изобр., 1982, № 17.
- 148. Черепанов, С.В.** Глубокая переработка яиц: мировая практика и тенденции [Текст] / С.В.Черепанов // Птицеводство.-2005.-.Ус 1.- с.32-34.
- 149. Шевцов, А.А.** Развитие научных основ энергосбережения в процессах сушки пищевого растительного сырья: Теория, техника, способы производства и управления [Текст] :автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.18.12 - Воронеж, 1999 - Количество страниц: 40 с.

- 150. Штеле, Л.** Пищевая ценность яиц различной массы и моделирование их калорийности [Текст] / Л. Штеле, Л. Филатов // Птицеводство. 2012.-.Во6.-С.40-43.
- 151. Anhydro Closed Circuit Spray Drying Systems, Bulletin. Denmark: 1986.**
- 152. Chen, X.D.** Drying Technologies in Food Processing [Text] / X.D. Chen, Mujumdar A.S. – Oxford: Blackwell Publishers, 2008.- 360 p. ISBN: 1405157631 ISBN-13(EAN): 9781405157636
- 153. Dietary Reference Intakes: Energy, Carbohydrates, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids (Macronutrients) [Text] / National Academies Press. – Washington, 2002. - 46 p.**
- 154. May, B.K.** The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs [Text] / B.K. May, P. Perré // Journal of Food Eng. – 2002. - Vol. 54, № 4. – P. 271-282.
- 155. May, B.K.** Quantitative analysis of drying behaviour of fruit and vegetables [Text] / B.K. May, A.J. Sinclair, A.L. Halmos, V.N. Tran // Drying Technol. – 1999. - № 17. - P. 1441-1448.
- 156. May, B.K.** A Study of Temperature and Sample Dimension on the Drying of Potatoes [Text] / [B.K. May et al.] // Drying Technology. – 2000. - № 18. – P. 2291-2306.
- 157. Mersmann, A.** Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Methoden [Text] / A. Mersmann, M. Kind, J. Stichlmair. – Springer, 2005. – 664 S.
- 158. Method of reducing cholesterol and altering fatty acid control of eggs Pat.** 6630181 USA, Du Pont Specially Grains, Araba Miloud № 09/ 665787.
- 159. Mokdad, A. H.** The continuing epidemics of obesity and diabetes in the United States [Text] / [A.H. Mokdad et al.] // . J. Am. Med. Assoc. – 2001. - № 286. – P. 1195.
- 160. Nestel, P.J.** Fish oil and cardiovascular disease: lipids and arterial function. // Am. J. Clin. Nutr. -2000. Vol.71, -p.228-231.
- 161. Perre, P.** The existence of the first drying stage proved by two independent experimental evidences [Text] / P. Perre, B.K. May // Proceedings of of the 14th International Drying Symposium, Brazil. - 2004.
- 162. Piralishvili, Sh.A.** Vortex effects: theory, experiment, industrial application, prospects [Text] / Sh.A. Piralishvili, A.I. Azarov // Heat Transfer Research. – 2006. - Vol. 37. - P. 707-730.

163. Poultry egg with beneficial health and nutritive values: Pat. 6316041 USA A 23 LI/32, A 23 LI/ 32, A 23 K 1/18. LifeRight Foods,L.L.C., Stock Robert H, Compton James D. № 09/427297.

164. Van der Held, E.F.M. and Van Drunen, F.G. A metod of measuring the thermal conductivity of liquids. Physika, 1949, v.15, n.10, P.865-881.

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_w , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_w , %
Яичный белок при $T_{prod} = 278K$ и $T_{c.a.} = 423K$								
0,0	0,882	0,882	0,882	0,882	0,000	0,000	0,000	0,000
1,5	0,73	0,736	0,727	0,731	0,005	0,003	0,011	1,558
3,0	0,465	0,47	0,475	0,470	0,005	0,003	0,012	2,641
3,8	0,32	0,32	0,34	0,327	0,012	0,007	0,029	8,687
4,5	0,23	0,235	0,225	0,230	0,005	0,003	0,012	5,172
6,0	0,145	0,155	0,151	0,150	0,005	0,003	0,012	8,330
7,5	0,1	0,106	0,11	0,105	0,005	0,003	0,012	11,900
8,2	0,09	0,091	0,088	0,090	0,002	0,001	0,004	4,214
9,0	0,078	0,08	0,081	0,080	0,002	0,001	0,004	4,740
10,0	0,052	0,049	0,05	0,050	0,002	0,001	0,004	7,584
Яичный белок при $T_{prod} = 278K$ и $T_{c.a.} = 448K$								
0,0	0,882	0,882	0,882	0,882	0,000	0,000	0,000	0,000
1,2	0,78	0,75	0,75	0,760	0,017	0,010	0,043	5,658
2,4	0,49	0,52	0,52	0,510	0,017	0,010	0,043	8,431
3,6	0,27	0,28	0,29	0,280	0,010	0,006	0,025	8,866
4,8	0,175	0,17	0,165	0,170	0,005	0,003	0,012	7,302
6,0	0,11	0,11	0,112	0,111	0,001	0,001	0,003	2,606
6,7	0,087	0,091	0,093	0,090	0,003	0,002	0,008	8,427
7,2	0,081	0,081	0,079	0,080	0,001	0,001	0,003	3,583
8,0	0,072	0,069	0,07	0,070	0,002	0,001	0,004	5,417

Приложение 1 (продолжение)

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_w , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_w , %
Яичный белок при $T_{prod} = 278K$ и $T_{c.a.} = 473K$								
0,0	0,882	0,882	0,882	0,882	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,74	0,74	0,77	0,750	0,017	0,010	0,043	5,733
2,0	0,49	0,5	0,51	0,500	0,010	0,006	0,025	4,965
3,0	0,25	0,265	0,264	0,260	0,008	0,005	0,021	8,008
4,0	0,17	0,16	0,154	0,161	0,008	0,005	0,020	12,542
5,0	0,11	0,11	0,109	0,110	0,001	0,000	0,001	1,303
5,6	0,088	0,091	0,092	0,090	0,002	0,001	0,005	5,742
6,0	0,08	0,082	0,079	0,080	0,002	0,001	0,004	4,740
6,8	0,071	0,069	0,07	0,070	0,001	0,001	0,002	3,547
Яичный белок при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 423K$								
0,0	0,882	0,882	0,882	0,882	0,000	0,000	0,000	0,000
1,5	0,73	0,736	0,727	0,731	0,005	0,003	0,011	1,558
3,0	0,49	0,48	0,47	0,480	0,010	0,006	0,025	5,172
3,8	0,32	0,32	0,34	0,327	0,012	0,007	0,029	8,687
4,5	0,23	0,235	0,225	0,230	0,005	0,003	0,012	5,397
6,0	0,136	0,145	0,141	0,141	0,005	0,003	0,011	7,939
7,5	0,1	0,105	0,11	0,105	0,005	0,003	0,012	11,822
8,2	0,09	0,092	0,088	0,090	0,002	0,001	0,005	5,517
9,0	0,078	0,081	0,081	0,080	0,002	0,001	0,004	5,375
10,0	0,052	0,048	0,05	0,050	0,002	0,001	0,005	9,930

Приложение 1 (продолжение)

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_w , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_w , %
Яичный белок при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 448K$								
0,0	0,882	0,882	0,882	0,882	0,000	0,000	0,000	0,000
1,2	0,78	0,79	0,74	0,770	0,026	0,015	0,066	8,530
2,4	0,48	0,5	0,52	0,500	0,020	0,012	0,050	9,930
3,6	0,28	0,27	0,29	0,280	0,010	0,006	0,025	8,866
4,8	0,175	0,175	0,16	0,170	0,009	0,005	0,022	12,647
6,0	0,104	0,107	0,11	0,107	0,003	0,002	0,007	6,961
6,7	0,086	0,091	0,093	0,090	0,004	0,002	0,009	9,946
7,2	0,081	0,082	0,077	0,080	0,003	0,002	0,007	8,210
8,0	0,072	0,068	0,07	0,070	0,002	0,001	0,005	7,093
Яичный белок при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 473K$								
0,0	0,882	0,882	0,882	0,882	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,79	0,79	0,76	0,780	0,017	0,010	0,043	5,513
2,0	0,48	0,5	0,52	0,500	0,020	0,012	0,050	9,930
3,0	0,28	0,27	0,27	0,273	0,006	0,003	0,014	5,309
4,0	0,175	0,16	0,174	0,170	0,008	0,005	0,021	12,247
5,0	0,109	0,107	0,109	0,108	0,001	0,001	0,003	2,654
5,6	0,087	0,091	0,093	0,090	0,003	0,002	0,008	8,427
6,0	0,081	0,082	0,079	0,081	0,002	0,001	0,004	4,682
6,8	0,071	0,069	0,07	0,070	0,001	0,001	0,002	3,547

Приложение 1 (продолжение)

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_w , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_w , %
Яичный желток при $T_{prod} = 278K$ и $T_{c.a.} = 423K$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,452	0,457	0,44	0,450	0,009	0,005	0,022	4,820
1,8	0,31	0,32	0,3	0,310	0,010	0,006	0,025	8,008
2,3	0,19	0,2	0,21	0,200	0,010	0,006	0,025	12,413
2,9	0,145	0,138	0,138	0,140	0,004	0,002	0,010	7,167
3,6	0,086	0,084	0,086	0,085	0,001	0,001	0,003	3,373
4,5	0,063	0,065	0,059	0,062	0,003	0,002	0,008	12,233
5,0	0,051	0,049	0,05	0,050	0,001	0,001	0,002	4,965
5,4	0,045	0,046	0,045	0,045	0,001	0,000	0,001	3,185
6,1	0,04	0,041	0,038	0,040	0,002	0,001	0,004	9,481
Яичный желток при $T_{prod} = 278K$ и $T_{c.a.} = 448K$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
0,7	0,485	0,465	0,46	0,470	0,013	0,008	0,033	6,988
1,5	0,32	0,31	0,33	0,320	0,010	0,006	0,025	7,758
2,2	0,149	0,147	0,155	0,150	0,004	0,002	0,010	6,891
2,9	0,1	0,105	0,095	0,100	0,005	0,003	0,012	12,413
3,6	0,065	0,064	0,064	0,064	0,001	0,000	0,001	2,240
4,0	0,052	0,055	0,055	0,054	0,002	0,001	0,004	7,963
4,2	0,05	0,048	0,051	0,050	0,002	0,001	0,004	7,584
4,8	0,044	0,043	0,04	0,042	0,002	0,001	0,005	12,305

Приложение 1 (продолжение)

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_w , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_w , %
Яичный желток при $T_{prod} = 278K$ и $T_{c.a.} = 473K$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
0,6	0,479	0,47	0,49	0,480	0,010	0,006	0,025	5,181
1,2	0,282	0,29	0,3	0,291	0,009	0,005	0,022	7,720
1,8	0,165	0,155	0,161	0,160	0,005	0,003	0,012	7,810
2,4	0,105	0,11	0,115	0,110	0,005	0,003	0,012	11,285
3,0	0,062	0,064	0,068	0,065	0,003	0,002	0,008	11,668
3,6	0,055	0,058	0,054	0,056	0,002	0,001	0,005	9,228
3,9	0,05	0,049	0,051	0,050	0,001	0,001	0,002	4,965
4,3	0,043	0,044	0,041	0,043	0,002	0,001	0,004	8,819
Яичный желток при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 423K$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,46	0,457	0,435	0,451	0,014	0,008	0,034	7,531
1,8	0,31	0,32	0,3	0,310	0,010	0,006	0,025	8,008
2,3	0,19	0,205	0,21	0,202	0,010	0,006	0,026	12,920
2,9	0,145	0,135	0,14	0,140	0,005	0,003	0,012	8,866
3,6	0,086	0,084	0,085	0,085	0,001	0,001	0,002	2,921
4,5	0,06	0,065	0,059	0,061	0,003	0,002	0,008	12,872
5,0	0,052	0,048	0,05	0,050	0,002	0,001	0,005	9,930
5,4	0,044	0,047	0,045	0,045	0,002	0,001	0,004	8,427
6,1	0,041	0,041	0,038	0,040	0,002	0,001	0,004	10,750

Приложение 1 (продолжение)

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_w , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_w , %
Яичный желток при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 448K$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
0,7	0,48	0,468	0,46	0,469	0,010	0,006	0,025	5,317
1,5	0,31	0,32	0,33	0,320	0,010	0,006	0,025	7,758
2,2	0,147	0,15	0,155	0,151	0,004	0,002	0,010	6,689
2,9	0,105	0,1	0,095	0,100	0,005	0,003	0,012	12,413
3,6	0,063	0,064	0,065	0,064	0,001	0,001	0,002	3,879
4,0	0,052	0,055	0,056	0,054	0,002	0,001	0,005	9,570
4,2	0,051	0,048	0,051	0,050	0,002	0,001	0,004	8,600
4,8	0,044	0,043	0,04	0,042	0,002	0,001	0,005	12,305
Яичный желток при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 473K$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
0,6	0,47	0,448	0,49	0,469	0,021	0,012	0,052	11,097
1,2	0,31	0,32	0,33	0,320	0,010	0,006	0,025	7,758
1,8	0,148	0,15	0,154	0,151	0,003	0,002	0,008	5,056
2,4	0,105	0,1	0,096	0,100	0,005	0,003	0,011	11,195
3,0	0,062	0,064	0,066	0,064	0,002	0,001	0,005	7,758
3,6	0,053	0,054	0,056	0,054	0,002	0,001	0,004	7,023
3,9	0,051	0,049	0,051	0,050	0,001	0,001	0,003	5,733
4,3	0,042	0,044	0,041	0,042	0,002	0,001	0,004	9,029

Приложение 1 (продолжение)

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_W , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_W , %
Яичный меланж при $T_{prod} = 278K$ и $T_{c.a.} = 423K$								
0,0	0,75	0,75	0,75	0,750	0,000	0,000	0,000	0,000
1,3	0,64	0,605	0,615	0,620	0,018	0,010	0,045	7,219
2,7	0,411	0,43	0,42	0,420	0,010	0,005	0,024	5,618
3,4	0,33	0,34	0,32	0,330	0,010	0,006	0,025	7,523
4,0	0,26	0,27	0,28	0,270	0,010	0,006	0,025	9,195
5,3	0,175	0,17	0,165	0,170	0,005	0,003	0,012	7,302
6,7	0,1	0,094	0,1	0,098	0,003	0,002	0,009	8,776
7,3	0,09	0,085	0,088	0,088	0,003	0,001	0,006	7,100
8,0	0,086	0,085	0,084	0,085	0,001	0,001	0,002	2,921
9,0	0,061	0,061	0,057	0,060	0,002	0,001	0,006	9,556
Яичный меланж при $T_{prod} = 278K$ и $T_{c.a.} = 448K$								
0,0	0,75	0,75	0,75	0,750	0,000	0,000	0,000	0,000
1,1	0,64	0,68	0,66	0,660	0,020	0,012	0,050	7,523
2,1	0,432	0,431	0,428	0,430	0,002	0,001	0,005	1,202
3,2	0,235	0,26	0,255	0,250	0,013	0,008	0,033	13,137
4,3	0,164	0,16	0,159	0,161	0,003	0,002	0,007	4,080
5,3	0,11	0,108	0,107	0,108	0,002	0,001	0,004	3,511
5,9	0,094	0,092	0,092	0,093	0,001	0,001	0,003	3,082
6,2	0,083	0,084	0,088	0,085	0,003	0,002	0,007	7,727
7,2	0,074	0,068	0,068	0,070	0,003	0,002	0,009	12,286

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_w , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_w , %
Яичный меланж при $T_{prod} = 278K$ и $T_{c.a.} = 473K$								
0,0	0,75	0,75	0,75	0,750	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,68	0,66	0,64	0,660	0,020	0,012	0,050	7,523
2,0	0,43	0,44	0,45	0,440	0,010	0,006	0,025	5,642
3,0	0,24	0,235	0,245	0,240	0,005	0,003	0,012	5,172
4,0	0,15	0,151	0,15	0,150	0,001	0,000	0,001	0,956
5,0	0,11	0,105	0,115	0,110	0,005	0,003	0,012	11,285
5,6	0,092	0,088	0,09	0,090	0,002	0,001	0,005	5,517
6,0	0,083	0,088	0,084	0,085	0,003	0,002	0,007	7,727
6,8	0,076	0,075	0,074	0,075	0,001	0,001	0,002	3,310
Яичный меланж при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 423K$								
0,0	0,75	0,75	0,75	0,750	0,000	0,000	0,000	0,000
1,3	0,65	0,66	0,613	0,641	0,025	0,014	0,061	9,604
2,7	0,411	0,45	0,43	0,430	0,020	0,011	0,048	11,260
3,4	0,305	0,3	0,3	0,302	0,003	0,002	0,007	2,389
4,0	0,19	0,2	0,21	0,200	0,010	0,006	0,025	12,413
5,3	0,165	0,16	0,155	0,160	0,005	0,003	0,012	7,758
6,7	0,09	0,094	0,092	0,092	0,002	0,001	0,005	5,397
7,3	0,091	0,084	0,088	0,088	0,004	0,002	0,009	9,908
8,0	0,085	0,086	0,084	0,085	0,001	0,001	0,002	2,921
9,0	0,062	0,061	0,057	0,060	0,003	0,002	0,007	10,947

Приложение 1 (продолжение)

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_w , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_w , %
Яичный меланж при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 448K$								
0	0,75	0,75	0,75	0,750	0,000	0,000	0,000	0,000
1,1	0,66	0,68	0,64	0,660	0,020	0,012	0,050	7,523
2,1	0,411	0,42	0,43	0,420	0,010	0,005	0,024	5,618
3,2	0,235	0,26	0,255	0,250	0,013	0,008	0,033	13,137
4,3	0,164	0,158	0,155	0,159	0,005	0,003	0,011	7,110
5,3	0,11	0,108	0,104	0,107	0,003	0,002	0,008	7,088
5,9	0,094	0,088	0,092	0,091	0,003	0,002	0,008	8,427
6,2	0,082	0,084	0,088	0,085	0,003	0,002	0,008	8,923
7,2	0,061	0,062	0,058	0,060	0,002	0,001	0,005	8,613
Яичный меланж при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 473K$								
0,0	0,75	0,75	0,75	0,750	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,66	0,68	0,61	0,650	0,036	0,021	0,090	13,771
2,0	0,44	0,43	0,45	0,440	0,010	0,006	0,025	5,642
3,0	0,24	0,255	0,255	0,250	0,009	0,005	0,022	8,600
4,0	0,164	0,158	0,155	0,159	0,005	0,003	0,011	7,584
5,0	0,105	0,102	0,1	0,102	0,003	0,001	0,006	6,248
5,6	0,094	0,088	0,091	0,091	0,003	0,002	0,007	8,275
6,0	0,082	0,088	0,084	0,085	0,003	0,002	0,008	8,923
6,8	0,076	0,076	0,072	0,075	0,002	0,001	0,006	7,644

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_w , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_w , %
Яичный белок, комбинация прямоток – перекрестный ток при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 473K$								
0,0	0,882	0,882	0,882	0,882	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,82	0,79	0,78	0,8	0,021	0,012	0,052	6,460
2,0	0,55	0,555	0,545	0,55	0,005	0,003	0,012	2,257
2,7	0,355	0,36	0,365	0,36	0,005	0,003	0,012	3,448
3,3	0,235	0,236	0,222	0,23	0,008	0,005	0,019	8,430
4,1	0,139	0,137	0,145	0,14	0,004	0,002	0,010	7,383
5,3	0,087	0,091	0,093	0,09	0,003	0,002	0,008	8,427
Яичный желток, комбинация прямоток – перекрестный ток при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 473K$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,54	0,000	0,000	0,000	0,000
0,6	0,5	0,48	0,49	0,49	0,010	0,006	0,025	5,067
1,2	0,33	0,325	0,335	0,33	0,005	0,003	0,012	3,762
1,8	0,195	0,19	0,186	0,19	0,005	0,003	0,011	5,892
2,4	0,105	0,1	0,096	0,1	0,005	0,003	0,011	11,195
3,0	0,062	0,058	0,06	0,06	0,002	0,001	0,005	8,275
3,7	0,047	0,053	0,05	0,05	0,003	0,002	0,007	14,896

Приложение 2 (продолжение)

Результаты экспериментального определения влажности и их статистической обработки при исследовании кинетики конвективной распылительной сушке яичных продуктов

τ , с	W_1 , кг/кг	W_2 , кг/кг	W_3 , кг/кг	W , кг/кг	S_n , кг/кг	S_w , кг/кг	ΔW , кг/кг	ε_w , %
Яичный меланж, прямоток при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 458K$								
0,0	0,75	0,75	0,75	0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,67	0,64	0,61	0,64	0,030	0,017	0,074	11,637
2,0	0,445	0,425	0,45	0,43	0,013	0,008	0,033	7,638
3,0	0,24	0,255	0,255	0,25	0,009	0,005	0,022	8,600
4,0	0,166	0,156	0,155	0,15	0,006	0,004	0,015	10,067
5,0	0,1	0,102	0,105	0,1	0,003	0,001	0,006	6,248
5,6	0,094	0,088	0,091	0,09	0,003	0,002	0,007	8,275
5,9	0,082	0,088	0,084	0,085	0,003	0,002	0,008	8,923
Яичный меланж, комбинация прямоток – перекрестный ток при $T_{prod} = 298K$ и $T_{c.a.} = 458K$								
0,0	0,75	0,75	0,75	0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,66	0,68	0,67	0,67	0,010	0,006	0,025	3,705
2,0	0,47	0,475	0,465	0,47	0,005	0,003	0,012	2,641
3,0	0,27	0,285	0,285	0,28	0,009	0,005	0,021	7,679
3,5	0,205	0,205	0,19	0,2	0,009	0,005	0,022	10,750
4,5	0,105	0,102	0,1	0,1	0,003	0,001	0,006	6,248
5,3	0,09	0,088	0,087	0,088	0,002	0,001	0,004	4,309
5,7	0,082	0,088	0,084	0,085	0,003	0,002	0,008	8,923

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР
с использованием метода конечных разностей по невязной схеме
ОБЪЕКТ СУШКИ: ЯИЧНЫЙ БЕЛОК
СПОСОБ СУШКИ: КОНВЕКТИВНАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА (ПРЯМОТОК)

Единицы измерения - система СИ

Исходные данные:

1. Диаметр распыленной частицы, м

$X_n := 0$ - координата поверхности частицы

$X_k := 20 \cdot 10^{-6}$ - координата поверхности частицы

$d_e := X_k$ - диаметр частицы

2. Начальная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_n := 0.118$

3. Конечная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_k := 0.91$

4. Скорость движения сушильного агента относительно частицы, м/с

$w_v := 1$

5. Температура сушильного агента, К

$T := 473 \quad T_{sv} := T$

6. Плотность сушильного агента, кг/м³

$\rho_v := 1.293$

7. Коэффициент теплопроводности сушильного агента, Вт/(м К)

$$\lambda_v := 0.031$$

8. Динамическая вязкость сушильного агента, м²/с

$$\mu_v := 17.3 \cdot 10^{-6}$$

9. Давление в сушильной камере, Па

$$P_v := 101308.0$$

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ:

Единицы измерения результатов расчета - система СИ

10. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:

$$\alpha := 0.123 \cdot \left(\rho_v \cdot \frac{w_v \cdot d_e}{\mu_v} \right)^{0.83} \cdot \frac{\lambda_v}{d_e}$$

ζ - текущая концентрация сухих веществ

11. Плотность для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\rho(\zeta, t) := \left(-0.00079498 \cdot t^2 - 11.36771557 \cdot t + 3865.49211749 \right) \cdot (1 - \zeta)^3 \dots \\ + \left(0.00312139 \cdot t^2 + 16.5239862 \cdot t - 5813.49256206 \right) \cdot (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(0.00001526 \cdot t^2 - 7.39549681 \cdot t + 2112.55017613 \right) \cdot (1 - \zeta) + \left(-0.00118192 \cdot t^2 + 0.73171306 \cdot t + 1204.88431154 \right)$$

12. Коэффициент теплопроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\lambda(\zeta, t) := (-0.00008381 \cdot t^2 + 0.05256859 \cdot t - 9.51924974) \cdot (1 - \zeta)^3 \dots \\ + (0.00014738 \cdot t^2 - 0.09247771 \cdot t + 16.70412007) \cdot (1 - \zeta)^2 \dots \\ + (-0.0000681 \cdot t^2 + 0.04345862 \cdot t - 7.31823056) \cdot (1 - \zeta) + (0.00000941 \cdot t^2 - 0.00555272 \cdot t + 0.86696502)$$

13. Массовая теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cm(\zeta, t) := 2361.5385 \cdot (1 - \zeta) + 1820.4615$$

14. Объемная теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cr(\zeta, t) := \rho(\zeta, t) \cdot cm(\zeta, t)$$

15. Коэффициент температуропроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

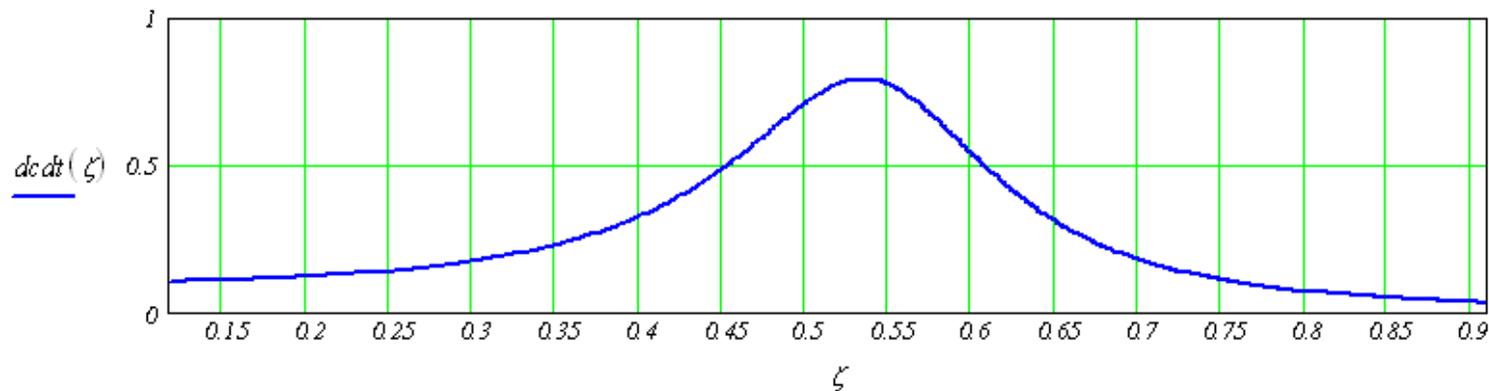
$$a'(\zeta, t) := \frac{\lambda(\zeta, t)}{cr(\zeta, t)}$$

16. Кинетические коэффициенты зависимости скорости сушки:

$$Ak := 0.03020152 \quad Bk := -28.28122392 \quad Ck := 6667.34414608 \quad Dk := -0.05976552 \quad Ek := 56.08067592 \\ Fk := -13284.72838608 \quad Gk := 0.03952696 \quad Hk := -37.20849816 \quad Kk := 8876.10999584 \quad Lk := -0.00999832 \\ Mk := 9.50382472 \quad Nk := -2305.87655728$$

17. Зависимость скорости сушки

$$dc dt(\zeta) := \frac{-1}{\left[4 \cdot (Ak \cdot T^2 + Bk \cdot T + Ck) \cdot (1 - \zeta)^3 + 3 \cdot (Dk \cdot T^2 + Ek \cdot T + Fk) \cdot (1 - \zeta)^2 \dots \right. \\ \left. + 2 \cdot (Gk \cdot T^2 + Hk \cdot T + Kk) \cdot (1 - \zeta) + (Lk \cdot T^2 + Mk \cdot T + Nk) \right]}$$



18. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход для свободной влаги:

$$r1(\zeta, t) := 3118.4581 \cdot 10^3 - 2286.66 \cdot t$$

19. Эмпирические коэффициенты:

$$a := 0.0009349 \quad b := -5.9701747 \quad c := 0.0047747 \quad d := 4.8297758$$

$$e := 0.0031918 \quad f := -0.0945955 \quad g := -0.0000089 \quad h := 0.0060967$$

20. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом в гигроскопической области:

$$R := 8.314 \quad \text{- универсальная газовая постоянная}$$

$$r2(\zeta, t) := r1(\zeta, t) - 55.55555 \cdot \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \dots$$

$$+ 55.55555 \cdot \left[-t \cdot \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \right]$$

21. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом:

$$Wg := 0.122 \quad \text{- гигроскопическая влажность}$$

$$C_g := 1 - W_g \quad C_g = 0.87800$$

$$r(\zeta, t) := \text{if}(\zeta < C_g, r1(\zeta, t), r2(\zeta, t))$$

22. Температурный коэффициент

$$D'(\zeta, t) := \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$K(\zeta, t) := \frac{d}{d\zeta} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$\delta(\zeta, t) := D'(\zeta, t) \cdot K(\zeta, t)$$

23. Решение методом конечных разностей уравнения теплопереноса:

$$A(\zeta, t) := \frac{k' a'(\zeta, t)}{dc dt(\zeta)} \quad B(\zeta, t) := 0 \quad D(\zeta, t) := \left(\frac{-\rho(\zeta, t) r(\zeta, t)}{cr(\zeta, t) \cdot k''} \right)$$

Число узлов сетки по концентрации и радиусу частицы

$$N_c := 13 \quad N_x := 10 \quad i := 0, 1 \dots N_x \quad k := 0, 1 \dots N_c$$

Значение шага сетки по концентрации и радиусу частицы

$$\tau := \frac{C_k - C_n}{N_c} \quad h := \frac{X_k - X_n}{N_x} \quad x_i := X_n + i \cdot h \quad c_{ck} := C_n + k \cdot \tau$$

$$z := \left[\begin{array}{l} \text{for } k \in 0, 1 \dots N_c \\ \left| \begin{array}{l} P_{0,k} \leftarrow 0 \\ q_{0,k} \leftarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$\psi_k \leftarrow 0$$

$$\psi_{\ell k} \leftarrow 0$$

for $i \in 0, 1 \dots N_x$

$$Y_{i,0} \leftarrow 298$$

$$P_{i,0} \leftarrow 0$$

$$q_{i,0} \leftarrow 0$$

for $k \in 0, 1 \dots N_c - 1$

$$pom \leftarrow \alpha \cdot \left(\frac{T_{sr} - Y_{0,k}}{T_{sr}} \right)^{0.25} \cdot (T_{sr} - Y_{0,k})$$

$$\psi_{k+1} \leftarrow pom$$

$$\psi_{\ell k+1} \leftarrow pom$$

for $i \in 0, 1 \dots N_x$

$$AA_{i,k+1} \leftarrow -\frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h}$$

$$BB_{i,k+1} \leftarrow \left(\frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{2} \right) \cdot \tau + 1$$

$$CC_{i,k+1} \leftarrow AA_{i,k+1}$$

$$DDpl \leftarrow \text{if} \left(i < N_x, Y_{i+1,k}, Y_{N_x,k} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k})} \cdot \psi_{\ell k+1} \right)$$

$$DDp \leftarrow \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot \text{if} \left(i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} \dots \right) - \left(\frac{B(cc_k, Y_{i,k}) \dots}{+ 2 \cdot \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2}} \right) \cdot Y_{i,k} \dots$$

$$+ \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot DDp1$$

$$DD_{i,k+1} \leftarrow Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}, Y_{i,k}) + D(cc_k, Y_{i,k}) + DDp)$$

$$P_{0,k+1} \leftarrow -\frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$$

$$q_{0,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}$$

for $i \in 1, 2 \dots Nx - 1$

$$P_{i,k+1} \leftarrow \frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

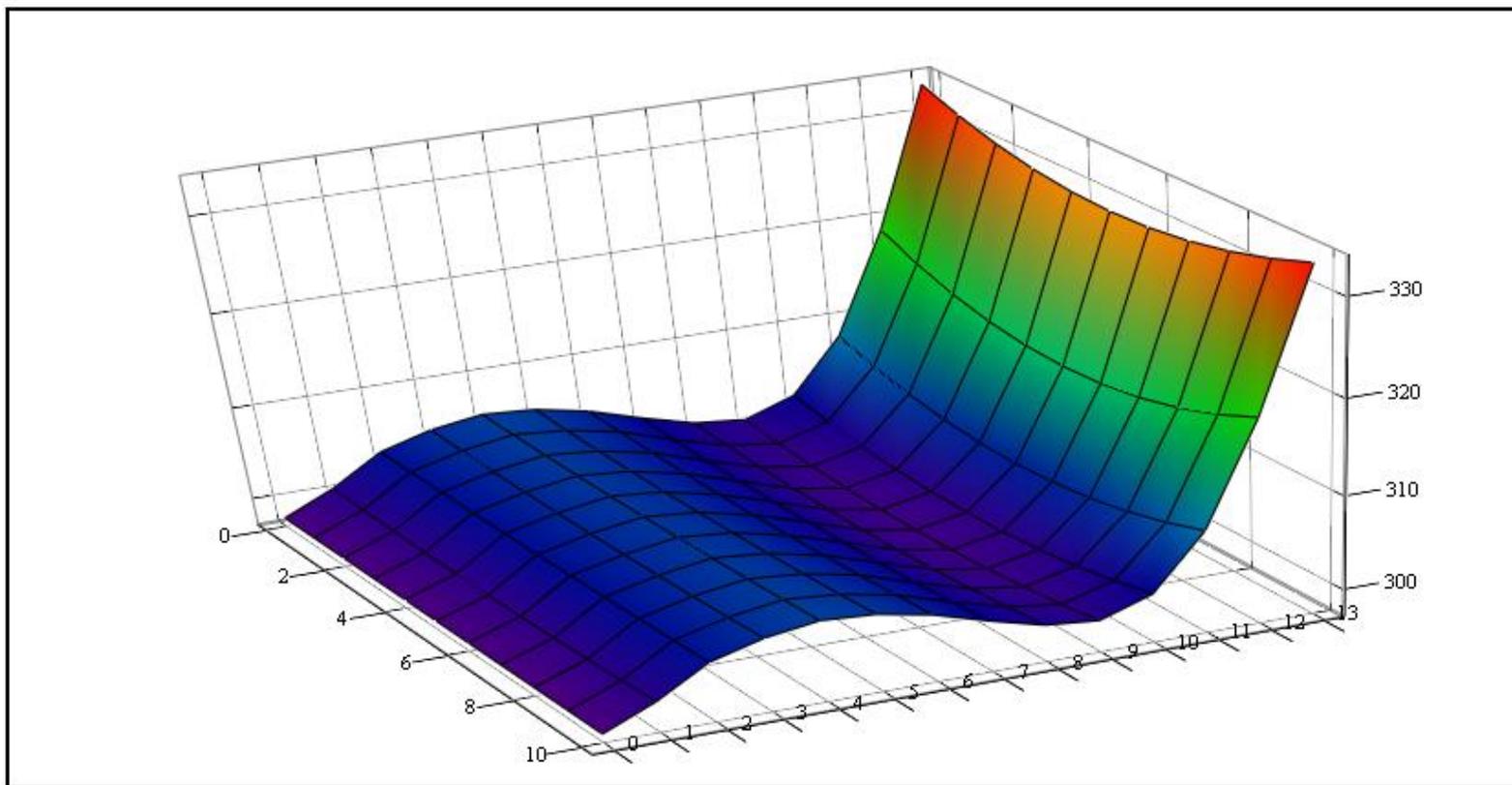
$$q_{i,k+1} \leftarrow \frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$Y_{Nx,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot CC_{Nx,k+1} \cdot \psi_{k+1} - \lambda(cc_{k+1}, Y_{Nx,k}) \cdot [DD_{Nx,k+1} - q_{Nx-1,k+1} \cdot (AA_{Nx,k+1} + CC_{Nx,k+1})]}{-\lambda(cc_{k+1}, Y_{Nx,k}) \cdot [BB_{Nx,k+1} + P_{Nx-1,k+1} \cdot (AA_{Nx,k+1} + CC_{Nx,k+1})]}$$

for $i \in Nx - 1, Nx - 2 \dots 0$

$$\left[\begin{array}{l} | \\ | \\ Y \end{array} \right] \quad Y_{i,k+1} \leftarrow P_{i,k+1} \cdot Y_{i+1,k+1} + q_{i,k+1}$$

24. Температурное поле по концентрации сухих веществ и радиусу продукта:



25. Значение температур в узловых точках:

$$z = \begin{pmatrix} 298 & 300.37 & 303.48 & 304.97 & 305.75 & 305.37 & 304.25 & 302.54 & 301.04 & 300.48 & 302.3 & 308.03 & 318.73 & 333 \\ 298 & 300.17 & 303.39 & 304.78 & 305.61 & 305.14 & 304.03 & 302.2 & 300.63 & 299.88 & 301.4 & 306.66 & 316.95 & 331.53 \\ 298 & 300.01 & 303.32 & 304.64 & 305.48 & 304.98 & 303.82 & 301.98 & 300.29 & 299.43 & 300.71 & 305.61 & 315.57 & 330.37 \\ 298 & 299.9 & 303.26 & 304.55 & 305.39 & 304.88 & 303.65 & 301.84 & 300.05 & 299.12 & 300.22 & 304.88 & 314.58 & 329.53 \\ 298 & 299.83 & 303.23 & 304.49 & 305.33 & 304.82 & 303.55 & 301.76 & 299.91 & 298.94 & 299.93 & 304.43 & 313.99 & 329.02 \\ 298 & 299.81 & 303.22 & 304.47 & 305.31 & 304.8 & 303.51 & 301.74 & 299.86 & 298.88 & 299.83 & 304.29 & 313.79 & 328.85 \\ 298 & 299.83 & 303.23 & 304.49 & 305.33 & 304.82 & 303.55 & 301.76 & 299.91 & 298.94 & 299.93 & 304.43 & 313.99 & 329.02 \\ 298 & 299.9 & 303.26 & 304.55 & 305.39 & 304.88 & 303.65 & 301.84 & 300.05 & 299.12 & 300.22 & 304.88 & 314.58 & 329.53 \\ 298 & 300.01 & 303.32 & 304.64 & 305.48 & 304.98 & 303.82 & 301.98 & 300.29 & 299.43 & 300.71 & 305.61 & 315.57 & 330.37 \\ 298 & 300.17 & 303.39 & 304.78 & 305.61 & 305.14 & 304.03 & 302.2 & 300.63 & 299.88 & 301.4 & 306.66 & 316.95 & 331.53 \\ 298 & 300.37 & 303.48 & 304.97 & 305.75 & 305.37 & 304.25 & 302.54 & 301.04 & 300.48 & 302.3 & 308.03 & 318.73 & 333 \end{pmatrix}$$

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР
с использованием метода конечных разностей по неявной схеме

ОБЪЕКТ СУШКИ: ЯИЧНЫЙ БЕЛОК
СПОСОБ СУШКИ: КОНВЕКТИВНАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА (ПРЯМОТОК И ПЕРЕКРЕСТНЫЙ ТОК)
Единицы измерения - система СИ

Исходные данные:

1. Диаметр распыленной частицы, м

$X_n := 0$ - координата поверхности частицы

$X_k := 20 \cdot 10^{-6}$ - координата поверхности частицы

$d_e := X_k$ - диаметр частицы

2. Начальная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_n := 0.118$

3. Конечная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_k := 0.91$

4. Скорость движения сушильного агента относительно частицы, м/с

$w_v := 1$

5. Температура сушильного агента, К

$T := 473$ $T_{sr} := T$

6. Плотность сушильного агента, кг/м³

$\rho_v := 1.293$

7. Коэффициент теплопроводности сушительного агента, Вт/(м К)

$$\lambda_v := 0.031$$

8. Динамическая вязкость сушительного агента, м²/с

$$\mu_v := 17.3 \cdot 10^{-6}$$

9. Давление в сушительной камере, Па

$$P_v := 101308.0$$

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ:

Единицы измерения результатов расчета - система СИ

10. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:

$$\alpha := 0.123 \cdot \left(\rho_v \cdot \frac{w_v \cdot d_e}{\mu_v} \right)^{0.83} \cdot \frac{\lambda_v}{d_e}$$

ζ - текущая концентрация сухих веществ

11. Плотность для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\rho(\zeta, t) := \left(-0.00079498 \cdot t^2 - 11.36771557 \cdot t + 3865.49211749 \right) \cdot (1 - \zeta)^3 \dots \\ + \left(0.00312139 \cdot t^2 + 16.5239862 \cdot t - 5813.49256206 \right) \cdot (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(0.00001526 \cdot t^2 - 7.39549681 \cdot t + 2112.55017613 \right) \cdot (1 - \zeta) + \left(-0.00118192 \cdot t^2 + 0.73171306 \cdot t + 1204.88431154 \right)$$

12. Коэффициент теплопроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\lambda(\zeta, t) := \left(-0.00008381 \cdot t^2 + 0.05256859 \cdot t - 9.51924974\right) \cdot (1 - \zeta)^3 \dots \\ + \left(0.00014738 \cdot t^2 - 0.09247771 \cdot t + 16.70412007\right) \cdot (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(-0.0000681 \cdot t^2 + 0.04345862 \cdot t - 7.31823056\right) \cdot (1 - \zeta) + \left(0.00000941 \cdot t^2 - 0.00555272 \cdot t + 0.86696502\right)$$

13. Массовая теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cm(\zeta, t) := 2361.5385 \cdot (1 - \zeta) + 1820.4615$$

14. Объемная теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cr(\zeta, t) := \rho(\zeta, t) \cdot cm(\zeta, t)$$

15. Коэффициент температуропроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

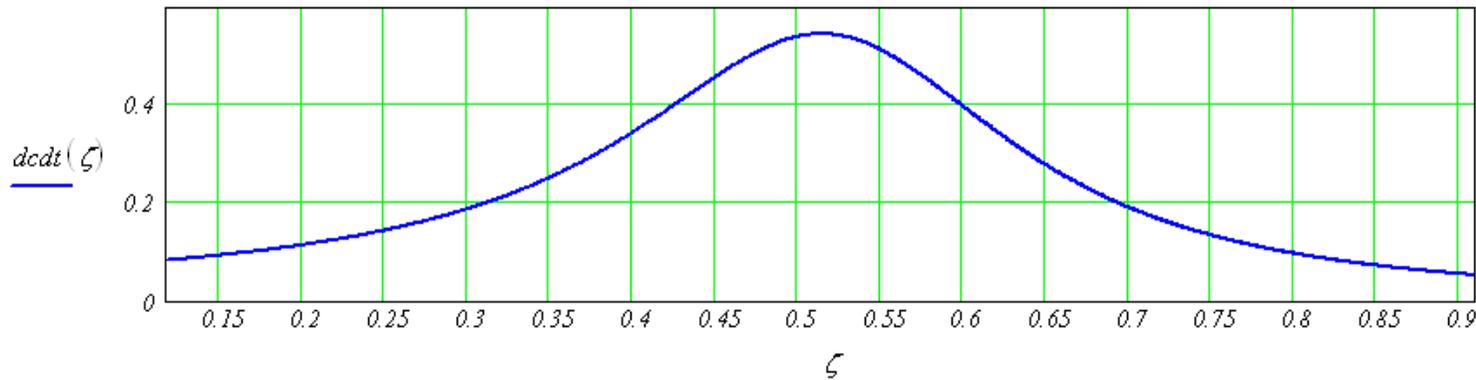
$$a'(\zeta, t) := \frac{\lambda(\zeta, t)}{cr(\zeta, t)}$$

16. Кинетические коэффициенты зависимости скорости сушки:

$$ak := 14.2591 \quad bk := -57.1543 \quad ck := 63.0857 \quad dk := -29.2050$$

17. Зависимость скорости сушки

$$dcdt(\zeta) := \frac{-1}{\left[4 \cdot ak \cdot (1 - \zeta)^3 + 3 \cdot bk \cdot (1 - \zeta)^2 + 2 \cdot ck \cdot (1 - \zeta) + dk\right]}$$



18. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход для свободной влаги:

$$r1(\zeta, t) := 3118.4581 \cdot 10^3 - 2286.66 \cdot t$$

19. Эмпирические коэффициенты:

$$a := 0.0009349 \quad b := -5.9701747 \quad c := 0.0047747 \quad d := 4.8297758$$

$$e := 0.0031918 \quad f := -0.0945955 \quad g := -0.0000089 \quad h := 0.0060967$$

20. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом в гигроскопической области:

$R := 8.314$ - универсальная газовая постоянная

$$r2(\zeta, t) := r1(\zeta, t) - 55.55555 \cdot \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \dots$$

$$+ 55.55555 \cdot \left[-t \cdot \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \right]$$

21. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом:

$Wg := 0.122$ - гигроскопическая влажность

$$Cg := 1 - Wg \quad Cg = 0.87800$$

$$r(\zeta, t) := \text{if}(\zeta < Cg, r1(\zeta, t), r2(\zeta, t))$$

22. Температурный коэффициент

$$D'(\zeta, t) := \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$K(\zeta, t) := \frac{d}{d\zeta} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$\delta(\zeta, t) := D'(\zeta, t) \cdot K(\zeta, t)$$

23. Решение методом конечных разностей уравнения теплопереноса:

$$A(\zeta, t) := \frac{k' a'(\zeta, t)}{dc dt(\zeta)} \quad B(\zeta, t) := 0 \quad D(\zeta, t) := \left(\frac{-\rho(\zeta, t) r(\zeta, t)}{cr(\zeta, t) \cdot k''} \right)$$

Число узлов сетки по концентрации и радиусу частицы

$$Nc := 13 \quad Nk := 10 \quad i := 0, 1 \dots Nk \quad k := 0, 1 \dots Nc$$

Значение шага сетки по концентрации и радиусу частицы

$$\tau := \frac{C_k - C_n}{Nc} \quad h := \frac{X_k - X_n}{Nk} \quad x_i := X_n + ih \quad cc_k := C_n + k \cdot \tau$$

$$z := \left[\begin{array}{l} \text{for } k \in 0, 1 \dots Nc \\ \left| \begin{array}{l} P_{0,k} \leftarrow 0 \\ q_{0,k} \leftarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right]$$

$$\psi_k \leftarrow 0$$

$$\psi2_k \leftarrow 0$$

for $i \in 0, 1 \dots N_x$

$$Y_{i,0} \leftarrow 298$$

$$P_{i,0} \leftarrow 0$$

$$q_{i,0} \leftarrow 0$$

for $k \in 0, 1 \dots N_c - 1$

$$pom \leftarrow \alpha \cdot \left(\frac{T_{sr} - Y_{0,k}}{T_{sr}} \right)^{0.25} \cdot (T_{sr} - Y_{0,k})$$

$$\psi_{k+1} \leftarrow pom$$

$$\psi2_{k+1} \leftarrow pom$$

for $i \in 0, 1 \dots N_x$

$$AA_{i,k+1} \leftarrow -\frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h}$$

$$BB_{i,k+1} \leftarrow \left(\frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{2} \right) \cdot \tau + 1$$

$$CC_{i,k+1} \leftarrow AA_{i,k+1}$$

$$DDp1 \leftarrow \text{if} \left(i < N_x, Y_{i+1,k}, Y_{N_x,k} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k})} \cdot \psi2_{k+1} \right)$$

$$DDp \leftarrow \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot \text{if} \left(i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} \dots \right) - \left(\begin{array}{c} B(cc_k, Y_{i,k}) \dots \\ + 2 \cdot \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \end{array} \right) \cdot Y_{i,k} \dots$$

$$+ \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot DDp_l$$

$$DD_{i,k+1} \leftarrow Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}, Y_{i,k}) + D(cc_k, Y_{i,k}) + DDp)$$

$$P_{0,k+1} \leftarrow -\frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$$

$$q_{0,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}$$

for $i \in 1, 2 \dots N_x - 1$

$$P_{i,k+1} \leftarrow \frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

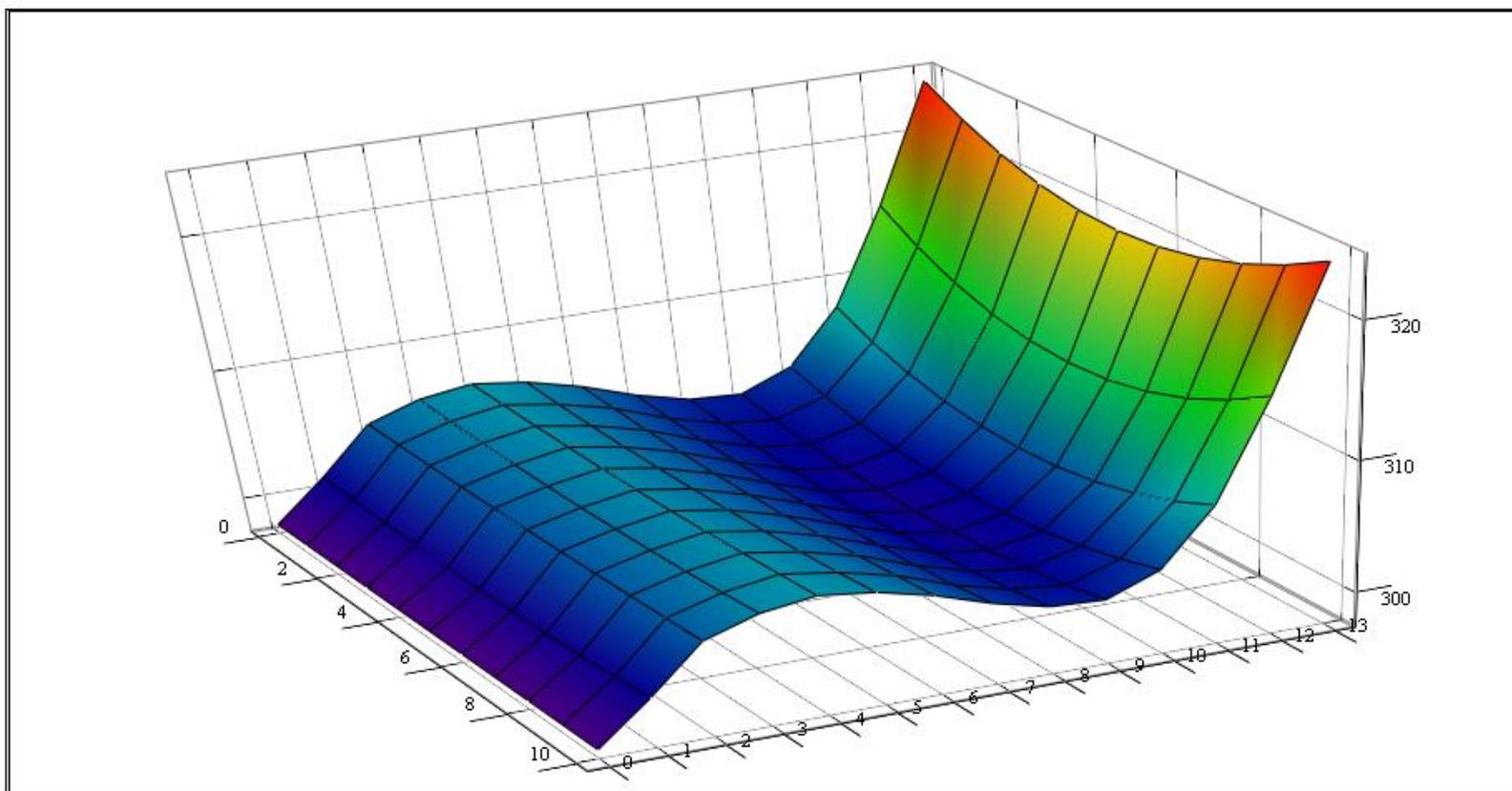
$$q_{i,k+1} \leftarrow \frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$Y_{N_x,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot CC_{N_x,k+1} \cdot \psi_{2k+1} - \lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [DD_{N_x,k+1} - q_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}{-\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [BB_{N_x,k+1} + P_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}$$

for $i \in N_x - 1, N_x - 2 \dots 0$

$$\left[\begin{array}{l} | \\ | \\ Y \end{array} \right] \quad Y_{i,k+1} \leftarrow P_{i,k+1} \cdot Y_{i+1,k+1} + q_{i,k+1}$$

24. Температурное поле по концентрации сухих веществ и радиусу продукта:



25. Значение температур в узловых точках:

z =	298	301.14	304.67	305.93	306.47	305.95	304.93	303.55	302.53	302.28	303.81	307.93	315.15	323.82
	298	300.92	304.59	305.73	306.34	305.71	304.71	303.21	302.12	301.68	302.93	306.59	313.36	322.2
	298	300.76	304.53	305.58	306.22	305.55	304.5	302.99	301.78	301.24	302.24	305.57	311.96	320.92
	298	300.64	304.48	305.48	306.13	305.45	304.33	302.85	301.53	300.94	301.76	304.86	310.97	319.99
	298	300.57	304.46	305.42	306.07	305.4	304.23	302.77	301.39	300.76	301.47	304.43	310.38	319.43
	298	300.54	304.45	305.4	306.05	305.38	304.2	302.75	301.34	300.7	301.37	304.29	310.18	319.24
	298	300.57	304.46	305.42	306.07	305.4	304.23	302.77	301.39	300.76	301.47	304.43	310.38	319.43
	298	300.64	304.48	305.48	306.13	305.45	304.33	302.85	301.53	300.94	301.76	304.86	310.97	319.99
	298	300.76	304.53	305.58	306.22	305.55	304.5	302.99	301.78	301.24	302.24	305.57	311.96	320.92
	298	300.92	304.59	305.73	306.34	305.71	304.71	303.21	302.12	301.68	302.93	306.59	313.36	322.2
	298	301.14	304.67	305.93	306.47	305.95	304.93	303.55	302.53	302.28	303.81	307.93	315.15	323.82

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР
с использованием метода конечных разностей по неявной схеме

ОБЪЕКТ СУШКИ: ЯИЧНЫЙ ЖЕЛТОК
СПОСОБ СУШКИ: КОНВЕКТИВНАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА (ПРЯМОТОК)
Единицы измерения - система СИ

Исходные данные:

1. Диаметр распыленной частицы, м

$X_n := 0$ - координата поверхности частицы

$X_k := 20 \cdot 10^{-6}$ - координата поверхности частицы

$d_e := X_k$ - диаметр частицы

2. Начальная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_n := 0.56$

3. Конечная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_k := 0.95$

4. Скорость движения сушильного агента относительно частицы, м/с

$w_v := 1$

5. Температура сушильного агента, К

$T := 473$ $T_{sp} := T$

6. Плотность сушильного агента, кг/м³

$\rho_v := 1.293$

7. Коэффициент теплопроводности сушильного агента, Вт/(м К)

$$\lambda_v := 0.031$$

8. Динамическая вязкость сушильного агента, м²/с

$$\mu_v := 17.3 \cdot 10^{-6}$$

9. Давление в сушильной камере, Па

$$P_v := 101308.0$$

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ:

Единицы измерения результатов расчета - система СИ

10. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:

$$\alpha := 0.123 \cdot \left(\rho_v \cdot \frac{w_v \cdot d_e}{\mu_v} \right)^{0.83} \cdot \frac{\lambda_v}{d_e}$$

ζ - текущая концентрация сухих веществ

11. Плотность для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\rho(\zeta, t) := \left(-0.03123512 \cdot t^2 + 19.41190244 \cdot t - 3051.25620812 \right) (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(0.02337442 \cdot t^2 - 14.58307701 \cdot t + 2229.02805985 \right) (1 - \zeta) \dots \\ + \left(-0.0041356 \cdot t^2 + 2.31181453 \cdot t + 735.35569345 \right)$$

12. Коэффициент теплопроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\lambda(\zeta, t) := \left(0.00008128 \cdot t^2 - 0.04907462 \cdot t + 8.62430954 \right) (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(-0.0000269 \cdot t^2 + 0.01733185 \cdot t - 2.84106206 \right) (1 - \zeta) \dots \\ + \left(0.00000469 \cdot t^2 - 0.00269459 \cdot t + 0.40404506 \right)$$

13. Массовая теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cm(\zeta, t) := 2167.308 \cdot (1 - \zeta) + 2014.692$$

14. Объемная теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cr(\zeta, t) := \rho(\zeta, t) \cdot cm(\zeta, t)$$

15. Коэффициент температуропроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$a'(\zeta, t) := \frac{\lambda(\zeta, t)}{cr(\zeta, t)}$$

16. Кинетические коэффициенты зависимости скорости сушки:

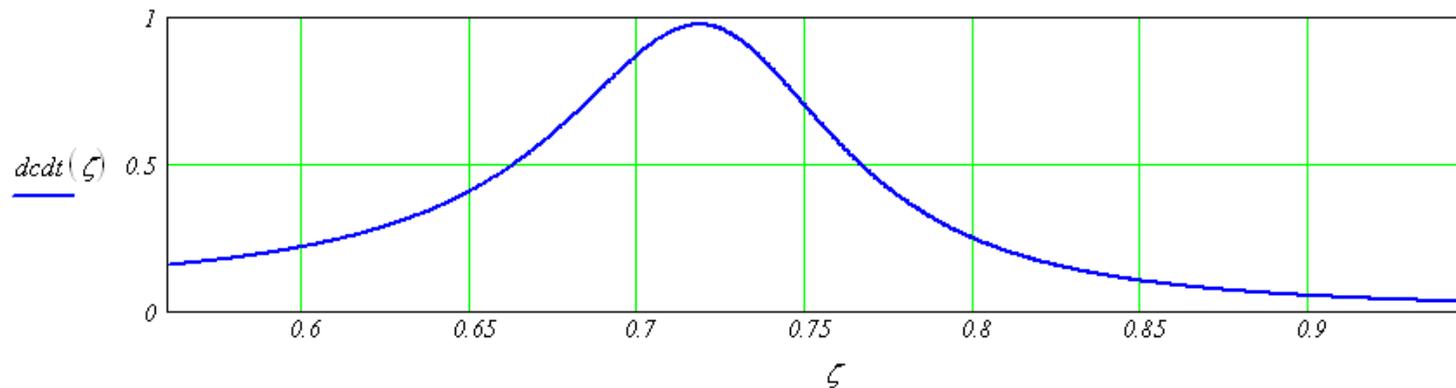
$$Ak := 0.11960184 \quad Bk := -113.15186264 \quad Ck := 27012.49246736 \quad Dk := -0.15236168 \quad Ek := 144.07256728$$

$$Fk := -34464.95741872 \quad Gk := 0.067108 \quad Hk := -63.320456 \quad Kk := 15160.941556 \quad Lk := -0.01223296$$

$$Mk := 11.51201616 \quad Nk := -2761.37483584$$

17. Зависимость скорости сушки

$$dc/dt(\zeta) := \frac{-1}{\left[4 \cdot (Ak \cdot T^2 + Bk \cdot T + Ck) \cdot (1 - \zeta)^3 + 3 \cdot (Dk \cdot T^2 + Ek \cdot T + Fk) \cdot (1 - \zeta)^2 \dots \right. \\ \left. + 2 \cdot (Gk \cdot T^2 + Hk \cdot T + Kk) \cdot (1 - \zeta) + (Lk \cdot T^2 + Mk \cdot T + Nk) \right]}$$



18. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход для свободной влаги:

$$r1(\zeta, t) := 3118.4581 \cdot 10^3 - 2286.66 \cdot t$$

19. Эмпирические коэффициенты:

$$a := -0.0884229 \quad b := 10.1736787 \quad c := 0.0886675 \quad d := -2.1566524$$

$$e := 0.0039533 \quad f := 3.8356502 \quad g := 0.0000255 \quad h := -0.0031964$$

20. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом в гигроскопической области:

$$R := 8.314 \quad \text{- универсальная газовая постоянная}$$

$$r2(\zeta, t) := r1(\zeta, t) - 55.55555 \cdot \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \dots \\ + 55.55555 \cdot \left[-t \cdot \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \right]$$

21. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом:

$$Wg := 0.122 \quad \text{- гигроскопическая влажность}$$

$$Cg := 1 - Wg \quad Cg = 0.87800$$

$$r(\zeta, t) := \text{if}(\zeta < Cg, r1(\zeta, t), r2(\zeta, t))$$

22. Термоградиентный коэффициент

$$D'(\zeta, t) := \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$K(\zeta, t) := \frac{d}{d\zeta} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$\delta(\zeta, t) := D'(\zeta, t) \cdot K(\zeta, t)$$

23. Решение методом конечных разностей уравнения теплопереноса:

$$A(\zeta, t) := \frac{k' a'(\zeta, t)}{dc dt(\zeta)} \quad B(\zeta, t) := 0 \quad D(\zeta, t) := \left(\frac{-\rho(\zeta, t) r(\zeta, t)}{cr(\zeta, t) \cdot k''} \right)$$

Число узлов сетки по концентрации и радиусу частицы

$$Nc := 13 \quad Nk := 10 \quad i := 0, 1 \dots Nk \quad k := 0, 1 \dots Nc$$

Значение шага сетки по концентрации и радиусу частицы

$$\tau := \frac{C_k - C_n}{Nc} \quad h := \frac{X_k - X_n}{Nk} \quad x_i := X_n + ih \quad cc_k := C_n + k \cdot \tau$$

$$z := \left[\begin{array}{l} \text{for } k \in 0, 1 \dots Nc \\ \left| \begin{array}{l} P_{0,k} \leftarrow 0 \\ q_{0,k} \leftarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

```

|  $\psi_k \leftarrow 0$ 
|  $\psi2_k \leftarrow 0$ 
for  $i \in 0, 1 \dots N_x$ 
|  $Y_{i,0} \leftarrow 298$ 
|  $P_{i,0} \leftarrow 0$ 
|  $q_{i,0} \leftarrow 0$ 
for  $k \in 0, 1 \dots N_c - 1$ 
|  $pom \leftarrow \alpha \cdot \left( \frac{T_{sr} - Y_{0,k}}{T_{sr}} \right)^{0.25} \cdot (T_{sr} - Y_{0,k})$ 
|  $\psi_{k+1} \leftarrow pom$ 
|  $\psi2_{k+1} \leftarrow pom$ 
for  $i \in 0, 1 \dots N_x$ 
|  $AA_{i,k+1} \leftarrow -\frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h}$ 
|  $BB_{i,k+1} \leftarrow \left( \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{2} \right) \cdot \tau + 1$ 
|  $CC_{i,k+1} \leftarrow AA_{i,k+1}$ 
|  $DDp1 \leftarrow \text{if} \left( i < N_x, Y_{i+1,k}, Y_{N_x,k} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k})} \cdot \psi2_{k+1} \right)$ 

```

$$DDp \leftarrow \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot \text{if} \left(i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} \dots \right. \\ \left. + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k})} \cdot \psi_{k+1} \right) - \left(\frac{B(cc_k, Y_{i,k}) \dots}{+ 2 \cdot \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2}} \right) \cdot Y_{i,k} \dots \\ + \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot DDp1$$

$$DD_{i,k+1} \leftarrow Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}, Y_{i,k}) + D(cc_k, Y_{i,k}) + DDp)$$

$$P_{0,k+1} \leftarrow -\frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$$

$$q_{0,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}$$

for $i \in 1, 2 \dots N_x - 1$

$$P_{i,k+1} \leftarrow \frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

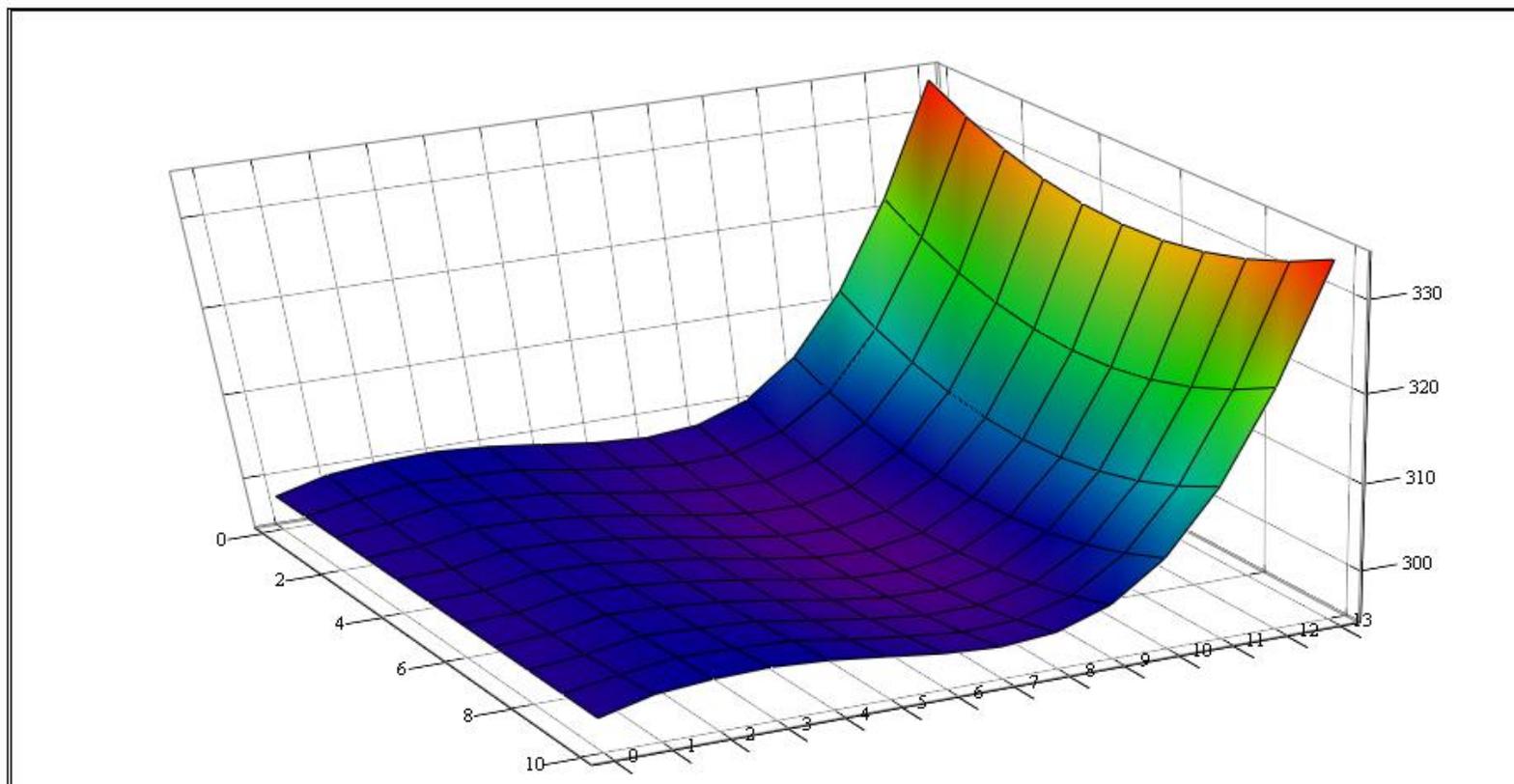
$$q_{i,k+1} \leftarrow \frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$Y_{N_x,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot CC_{N_x,k+1} \cdot \psi_{2k+1} - \lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [DD_{N_x,k+1} - q_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}{-\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [BB_{N_x,k+1} + P_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}$$

for $i \in N_x - 1, N_x - 2 \dots 0$

$$\left[\begin{array}{l} | \\ | \\ Y \end{array} \right] \quad Y_{i,k+1} \leftarrow P_{i,k+1} \cdot Y_{i+1,k+1} + q_{i,k+1}$$

24. Температурное поле по концентрации сухих веществ и радиусу продукта:



25. Значение температур в узловых точках:

z =	298	299.53	300.05	300.22	299.8	299	298.16	297.73	298.24	300.29	304.57	311.57	321.42	333.86
	298	298.99	299.82	299.64	299.38	298.26	297.45	296.75	297.02	298.71	302.58	309.21	318.91	331.61
	298	298.59	299.57	299.31	298.92	297.87	296.84	296.08	296.09	297.52	301.05	307.38	316.95	329.83
	298	298.33	299.37	299.12	298.55	297.59	296.45	295.6	295.45	296.68	299.97	306.08	315.53	328.54
	298	298.18	299.23	299.02	298.33	297.42	296.24	295.32	295.09	296.18	299.34	305.3	314.68	327.76
	298	298.13	299.19	298.99	298.26	297.35	296.18	295.23	294.96	296.01	299.12	305.04	314.4	327.5
	298	298.18	299.23	299.02	298.33	297.42	296.24	295.32	295.09	296.18	299.34	305.3	314.68	327.76
	298	298.33	299.37	299.12	298.55	297.59	296.45	295.6	295.45	296.68	299.97	306.08	315.53	328.54
	298	298.59	299.57	299.31	298.92	297.87	296.84	296.08	296.09	297.52	301.05	307.38	316.95	329.83
	298	298.99	299.82	299.64	299.38	298.26	297.45	296.75	297.02	298.71	302.58	309.21	318.91	331.61
298	299.53	300.05	300.22	299.8	299	298.16	297.73	298.24	300.29	304.57	311.57	321.42	333.86	

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР
с использованием метода конечных разностей по неявной схеме

ОБЪЕКТ СУШКИ: ЯИЧНЫЙ ЖЕЛТОК
СПОСОБ СУШКИ: КОНВЕКТИВНАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА (ПРЯМОТОК И ПЕРЕКРЕСТНЫЙ ТОК)
Единицы измерения - система СИ

Исходные данные:

1. Диаметр распыленной частицы, м

$X_n := 0$ - координата поверхности частицы

$X_k := 20 \cdot 10^{-6}$ - координата поверхности частицы

$d_g := X_k$ - диаметр частицы

2. Начальная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_n := 0.56$

3. Конечная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_k := 0.95$

4. Скорость движения сушильного агента относительно частицы, м/с

$w_v := 1$

5. Температура сушильного агента, К

$T := 473$ $T_{sr} := T$

6. Плотность сушильного агента, кг/м³

$\rho_v := 1.293$

7. Коэффициент теплопроводности сушительного агента, Вт/(м К)

$$\lambda_v := 0.031$$

8. Динамическая вязкость сушительного агента, м²/с

$$\mu_v := 17.3 \cdot 10^{-6}$$

9. Давление в сушительной камере, Па

$$P_v := 101308.0$$

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ:

Единицы измерения результатов расчета - система СИ

10. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:

$$\alpha := 0.123 \cdot \left(\rho_v \cdot \frac{w_v \cdot d_e}{\mu_v} \right)^{0.83} \cdot \frac{\lambda_v}{d_e}$$

ζ - текущая концентрация сухих веществ

11. Плотность для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\begin{aligned} \rho(\zeta, t) := & (-0.03123512 \cdot t^2 + 19.41190244 \cdot t - 3051.25620812)(1 - \zeta)^2 \dots \\ & + (0.02337442 \cdot t^2 - 14.58307701 \cdot t + 2229.02805985)(1 - \zeta) \dots \\ & + (-0.0041356 \cdot t^2 + 2.31181453 \cdot t + 735.35569345) \end{aligned}$$

12. Коэффициент теплопроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\lambda(\zeta, t) := \left(0.00008128 \cdot t^2 - 0.04907462 \cdot t + 8.62430954 \right) (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(-0.0000269 \cdot t^2 + 0.01733185 \cdot t - 2.84106206 \right) (1 - \zeta) \dots \\ + \left(0.00000469 \cdot t^2 - 0.00269459 \cdot t + 0.40404506 \right)$$

13. Массовая теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cm(\zeta, t) := 2167.308 \cdot (1 - \zeta) + 2014.692$$

14. Объемная теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cr(\zeta, t) := \rho(\zeta, t) \cdot cm(\zeta, t)$$

15. Коэффициент температуропроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

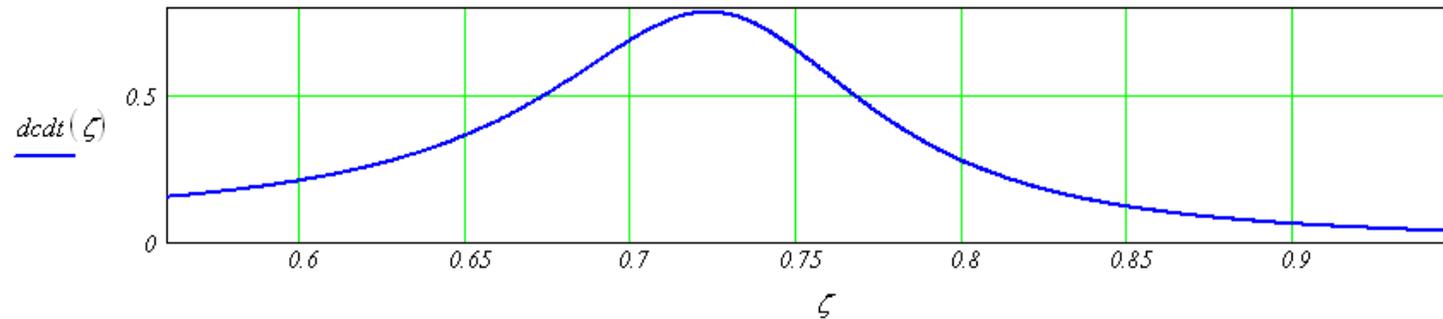
$$a'(\zeta, t) := \frac{\lambda(\zeta, t)}{cr(\zeta, t)}$$

16. Кинетические коэффициенты зависимости скорости сушки:

$$ak := 211.5668 \quad bk := -346.0441 \quad ck := 190.0514 \quad dk := -44.8993$$

17. Зависимость скорости сушки

$$dcdt(\zeta) := \frac{-1}{\left[4 \cdot ak \cdot (1 - \zeta)^3 + 3 \cdot bk \cdot (1 - \zeta)^2 + 2 \cdot ck \cdot (1 - \zeta) + dk \right]}$$



18. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход для свободной влаги:

$$r1(\zeta, t) := 3118.4581 \cdot 10^3 - 2286.66 \cdot t$$

19. Эмпирические коэффициенты:

$$a := -0.0884229 \quad b := 10.1736787 \quad c := 0.0886675 \quad d := -2.1566524$$

$$e := 0.0039533 \quad f := 3.8356502 \quad g := 0.0000255 \quad h := -0.0031964$$

20. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом в гигроскопической области:

$R := 8.314$ - универсальная газовая постоянная

$$r2(\zeta, t) := r1(\zeta, t) - 55.55555 \cdot \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \dots$$

$$+ 55.55555 \cdot \left[-t \cdot \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \right]$$

21. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом:

$Wg := 0.122$ - гигроскопическая влажность

$$Cg := 1 - Wg \quad Cg = 0.87800$$

$$r(\zeta, t) := \text{if}(\zeta < Cg, r1(\zeta, t), r2(\zeta, t))$$

22. Температурный коэффициент

$$D'(\zeta, t) := \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$K(\zeta, t) := \frac{d}{d\zeta} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$\delta(\zeta, t) := D'(\zeta, t) \cdot K(\zeta, t)$$

23. Решение методом конечных разностей уравнения теплопереноса:

$$A(\zeta, t) := \frac{k' a'(\zeta, t)}{dc dt(\zeta)} \quad B(\zeta, t) := 0 \quad D(\zeta, t) := \left(\frac{-\rho(\zeta, t) r(\zeta, t)}{cr(\zeta, t) \cdot k''} \right)$$

Число узлов сетки по концентрации и радиусу частицы

$$Nc := 13 \quad Nx := 10 \quad i := 0, 1 \dots Nx \quad k := 0, 1 \dots Nc$$

Значение шага сетки по концентрации и радиусу частицы

$$\tau := \frac{C_k - C_n}{Nc} \quad h := \frac{X_k - X_n}{Nx} \quad x_i := X_n + ih \quad cc_k := C_n + k \cdot \tau$$

$$z := \left[\begin{array}{l} \text{for } k \in 0, 1 \dots Nc \\ \left| \begin{array}{l} P_{0,k} \leftarrow 0 \\ q_{0,k} \leftarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right]$$

```

|  $\psi_k \leftarrow 0$ 
|  $\psi2_k \leftarrow 0$ 
for  $i \in 0, 1 \dots N_x$ 
|  $Y_{i,0} \leftarrow 298$ 
|  $P_{i,0} \leftarrow 0$ 
|  $q_{i,0} \leftarrow 0$ 
for  $k \in 0, 1 \dots N_c - 1$ 
|  $pom \leftarrow \alpha \cdot \left( \frac{T_{sr} - Y_{0,k}}{T_{sr}} \right)^{0.25} \cdot (T_{sr} - Y_{0,k})$ 
|  $\psi_{k+1} \leftarrow pom$ 
|  $\psi2_{k+1} \leftarrow pom$ 
for  $i \in 0, 1 \dots N_x$ 
|  $AA_{i,k+1} \leftarrow -\frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h}$ 
|  $BB_{i,k+1} \leftarrow \left( \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{2} \right) \cdot \tau + 1$ 
|  $CC_{i,k+1} \leftarrow AA_{i,k+1}$ 
|  $DDp1 \leftarrow \text{if} \left( i < N_x, Y_{i+1,k}, Y_{N_x,k} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k})} \cdot \psi2_{k+1} \right)$ 

```

$$DDp \leftarrow \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot \text{if} \left(i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} \dots \right. \\ \left. + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k})} \cdot \psi_{k+1} \right) - \left(\frac{B(cc_k, Y_{i,k}) \dots}{+ 2 \cdot \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2}} \right) \cdot Y_{i,k} \dots \\ + \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot DDp1$$

$$DD_{i,k+1} \leftarrow Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}, Y_{i,k}) + D(cc_k, Y_{i,k}) + DDp)$$

$$P_{0,k+1} \leftarrow -\frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$$

$$q_{0,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}$$

for $i \in 1, 2 \dots N_x - 1$

$$P_{i,k+1} \leftarrow \frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

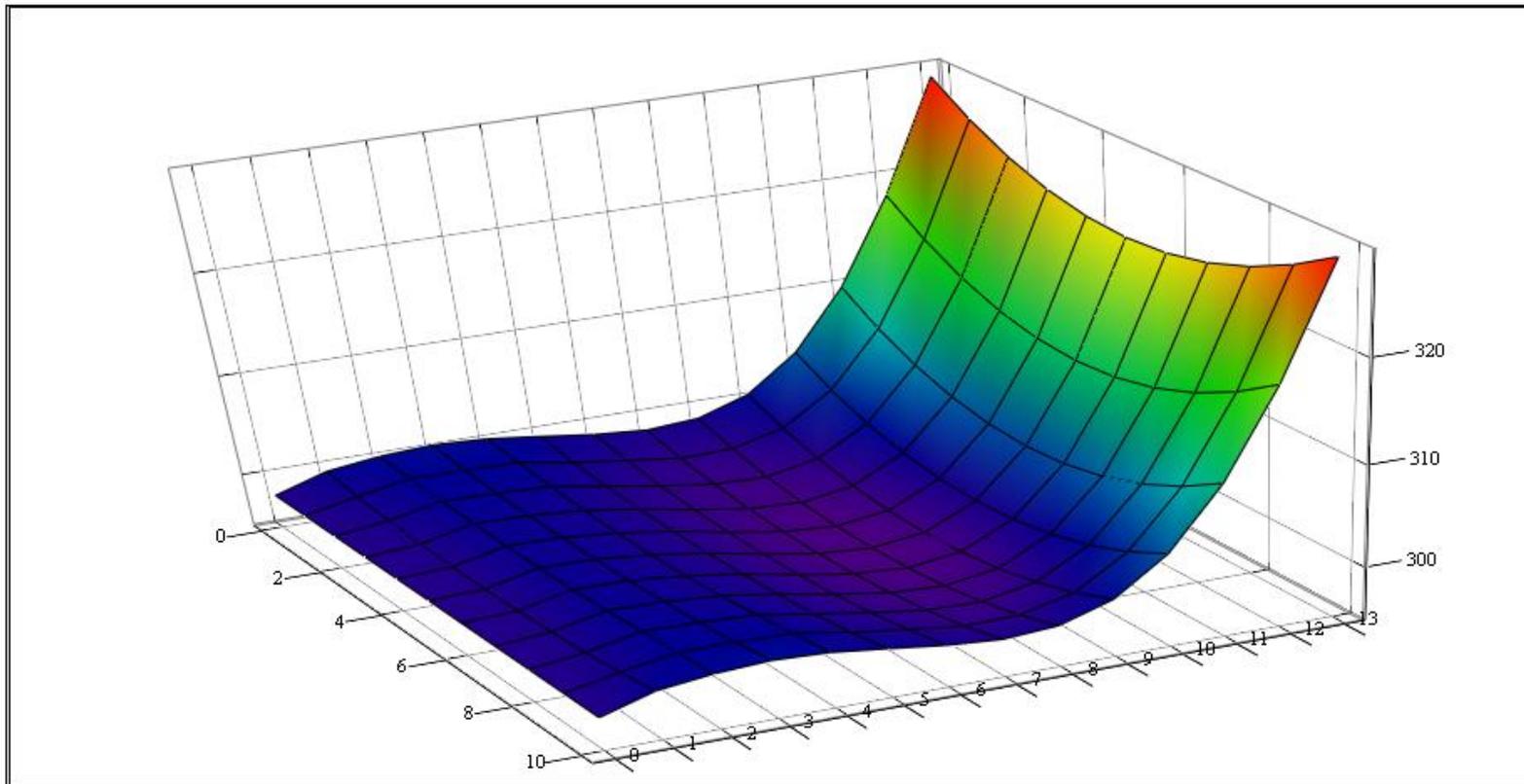
$$q_{i,k+1} \leftarrow \frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$Y_{N_x,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot CC_{N_x,k+1} \cdot \psi_{2k+1} - \lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [DD_{N_x,k+1} - q_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}{-\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [BB_{N_x,k+1} + P_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}$$

for $i \in N_x - 1, N_x - 2 \dots 0$

$$\left[\begin{array}{l} | \\ Y \end{array} \right] \quad Y_{i,k+1} \leftarrow P_{i,k+1} \cdot Y_{i+1,k+1} + q_{i,k+1}$$

24. Температурное поле по концентрации сухих веществ и радиусу продукта:



25. Значение температур в узловых точках:

$$z = \begin{pmatrix} 298 & 299.59 & 300.22 & 300.51 & 300.25 & 299.6 & 298.9 & 298.47 & 298.81 & 300.44 & 303.96 & 309.82 & 318.16 & 328.73 \\ 298 & 299.04 & 299.98 & 299.94 & 299.83 & 298.87 & 298.19 & 297.49 & 297.61 & 298.87 & 301.98 & 307.43 & 315.55 & 326.29 \\ 298 & 298.65 & 299.74 & 299.61 & 299.37 & 298.47 & 297.57 & 296.83 & 296.68 & 297.7 & 300.46 & 305.59 & 313.5 & 324.35 \\ 298 & 298.39 & 299.53 & 299.41 & 299.01 & 298.19 & 297.17 & 296.35 & 296.06 & 296.88 & 299.4 & 304.29 & 312.04 & 322.94 \\ 298 & 298.24 & 299.4 & 299.31 & 298.79 & 298.02 & 296.95 & 296.06 & 295.7 & 296.39 & 298.77 & 303.5 & 311.16 & 322.09 \\ 298 & 298.19 & 299.36 & 299.28 & 298.72 & 297.96 & 296.88 & 295.97 & 295.58 & 296.23 & 298.56 & 303.24 & 310.87 & 321.81 \\ 298 & 298.24 & 299.4 & 299.31 & 298.79 & 298.02 & 296.95 & 296.06 & 295.7 & 296.39 & 298.77 & 303.5 & 311.16 & 322.09 \\ 298 & 298.39 & 299.53 & 299.41 & 299.01 & 298.19 & 297.17 & 296.35 & 296.06 & 296.88 & 299.4 & 304.29 & 312.04 & 322.94 \\ 298 & 298.65 & 299.74 & 299.61 & 299.37 & 298.47 & 297.57 & 296.83 & 296.68 & 297.7 & 300.46 & 305.59 & 313.5 & 324.35 \\ 298 & 299.04 & 299.98 & 299.94 & 299.83 & 298.87 & 298.19 & 297.49 & 297.61 & 298.87 & 301.98 & 307.43 & 315.55 & 326.29 \\ 298 & 299.59 & 300.22 & 300.51 & 300.25 & 299.6 & 298.9 & 298.47 & 298.81 & 300.44 & 303.96 & 309.82 & 318.16 & 328.73 \end{pmatrix}$$

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР
с использованием метода конечных разностей по неявной схеме

ОБЪЕКТ СУШКИ: ЯПЧНЫЙ МЕЛАНЖ
СПОСОБ СУШКИ: КОНВЕКТИВНАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА (ПРЯМОТОК)
Единицы измерения - система СИ

Исходные данные:

1. Диаметр распыленной частицы, м

$X_n := 0$ - координата поверхности частицы

$X_k := 20 \cdot 10^{-6}$ - координата поверхности частицы

$d_{\varnothing} := X_k$ - диаметр частицы

2. Начальная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_n := 0.25$

3. Конечная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_k := 0.915$

4. Скорость движения сушильного агента относительно частицы, м/с

$w_{\gamma} := 1$

5. Температура сушильного агента, К

$T := 458 \quad T_{sr} := T$

6. Плотность сушильного агента, кг/м³

$\rho_{\gamma} := 1.293$

7. Коэффициент теплопроводности сушильного агента, Вт/(м К)

$$\lambda_v := 0.031$$

8. Динамическая вязкость сушильного агента, м²/с

$$\mu_v := 17.3 \cdot 10^{-6}$$

9. Давление в сушильной камере, Па

$$P_v := 101308.0$$

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ:

Единицы измерения результатов расчета - система СИ

10. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:

$$\alpha := 0.123 \cdot \left(\rho_v \cdot \frac{w_v \cdot d_e}{\mu_v} \right)^{0.83} \cdot \frac{\lambda_v}{d_e}$$

ξ - текущая концентрация сухих веществ

11. Плотность для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\rho(\xi, t) := \left(-0.02477948 \cdot t^2 + 16.45422863 \cdot t - 2877.07598118 \right) (1 - \xi)^2 \dots \\ + \left(0.02727754 \cdot t^2 - 17.52723521 \cdot t + 2669.50472105 \right) (1 - \xi) \dots \\ + \left(-0.00593494 \cdot t^2 + 3.27538496 \cdot t + 785.05342441 \right)$$

12. Коэффициент теплопроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\lambda(\zeta, t) := \left(0.00008857 \cdot t^2 - 0.05527926 \cdot t + 9.48766531\right) (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(-0.00006228 \cdot t^2 + 0.03942148 \cdot t - 6.28777592\right) (1 - \zeta) \dots \\ + \left(0.00000493 \cdot t^2 - 0.00277743 \cdot t + 0.41555978\right)$$

13. Массовая теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cm(\zeta, t) := 2407.273 \cdot (1 - \zeta) + 1774.727$$

14. Объемная теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cr(\zeta, t) := \rho(\zeta, t) \cdot cm(\zeta, t)$$

15. Коэффициент температуропроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

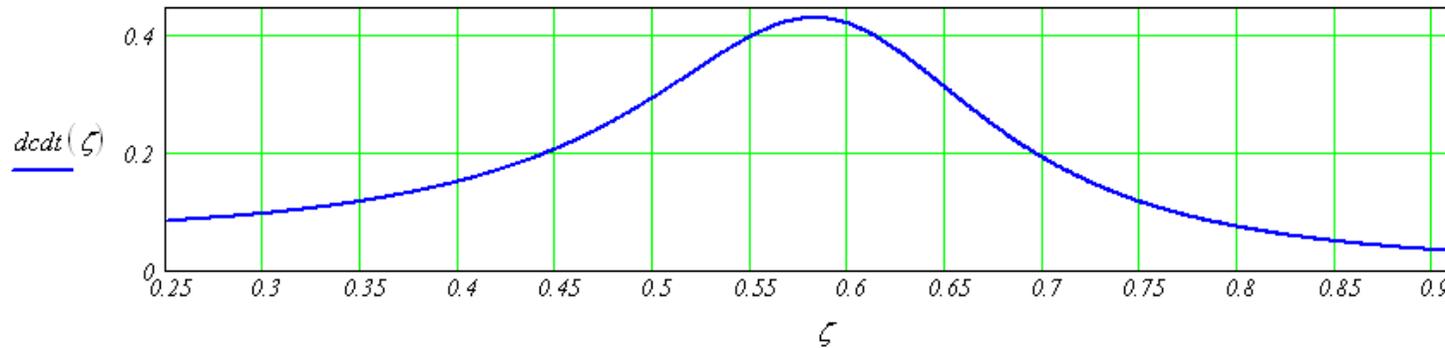
$$\alpha'(\zeta, t) := \frac{\lambda(\zeta, t)}{cr(\zeta, t)}$$

16. Кинетические коэффициенты зависимости скорости сушки:

$$ak := 68.7494 \quad bk := -174.1905 \quad ck := 146.2476 \quad dk := -53.362$$

17. Зависимость скорости сушки

$$dcdt(\zeta) := \frac{-1}{\left[4 \cdot ak \cdot (1 - \zeta)^3 + 3 \cdot bk \cdot (1 - \zeta)^2 + 2 \cdot ck \cdot (1 - \zeta) + dk\right]}$$



18. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход для свободной влаги:

$$r1(\zeta, t) := 3118.4581 \cdot 10^3 - 2286.66 \cdot t$$

19. Эмпирические коэффициенты:

$$a := 1.4906758 \quad b := -442.0545575 \quad c := -0.2663733 \quad d := 95.5221898$$

$$e := 0.0189544 \quad f := -3.2470631 \quad g := -0.0001196 \quad h := 0.0407289$$

20. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом в гигроскопической области:

$R := 8.314$ - универсальная газовая постоянная

$$r2(\zeta, t) := r1(\zeta, t) - 55.55555 \cdot \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \dots$$

$$+ 55.55555 \cdot \left[-t \cdot \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \right]$$

21. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом:

$Wg := 0.171$ - гигроскопическая влажность

$$C_g := 1 - W_g \quad C_g = 0.82900$$

$$r(\zeta, t) := \text{if}(\zeta < C_g, r1(\zeta, t), r2(\zeta, t))$$

22. Температурный коэффициент

$$D'(\zeta, t) := \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$K(\zeta, t) := \frac{d}{d\zeta} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$\delta(\zeta, t) := D'(\zeta, t) \cdot K(\zeta, t)$$

23. Решение методом конечных разностей уравнения теплопереноса:

$$A(\zeta, t) := \frac{k' a'(\zeta, t)}{dc dt(\zeta)} \quad B(\zeta, t) := 0 \quad D(\zeta, t) := \left(\frac{-\rho(\zeta, t) r(\zeta, t)}{cr(\zeta, t) \cdot k''} \right)$$

Число узлов сетки по концентрации и радиусу частицы

$$N_c := 13 \quad N_x := 10 \quad i := 0, 1 \dots N_x \quad k := 0, 1 \dots N_c$$

Значение шага сетки по концентрации и радиусу частицы

$$\tau := \frac{C_k - C_n}{N_c} \quad h := \frac{X_k - X_n}{N_x} \quad x_i := X_n + i \cdot h \quad c_{ck} := C_n + k \cdot \tau$$

$$z := \left[\begin{array}{l} \text{for } k \in 0, 1 \dots N_c \\ \left| \begin{array}{l} P_{0,k} \leftarrow 0 \\ q_{0,k} \leftarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right]$$

$$\psi_k \leftarrow 0$$

$$\psi_{2k} \leftarrow 0$$

for $i \in 0, 1 \dots N_x$

$$Y_{i,0} \leftarrow 298$$

$$P_{i,0} \leftarrow 0$$

$$q_{i,0} \leftarrow 0$$

for $k \in 0, 1 \dots N_c - 1$

$$pom \leftarrow \alpha \cdot \left(\frac{T_{sr} - Y_{0,k}}{T_{sr}} \right)^{0.25} \cdot (T_{sr} - Y_{0,k})$$

$$\psi_{k+1} \leftarrow pom$$

$$\psi_{2k+1} \leftarrow pom$$

for $i \in 0, 1 \dots N_x$

$$AA_{i,k+1} \leftarrow \frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h}$$

$$BB_{i,k+1} \leftarrow \left(\frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{2} \right) \cdot \tau + 1$$

$$CC_{i,k+1} \leftarrow AA_{i,k+1}$$

$$DDp1 \leftarrow \text{if} \left(i < N_x, Y_{i+1,k}, Y_{N_x,k} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k})} \cdot \psi_{2k+1} \right)$$

$$DDp \leftarrow \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot \text{if} \left(i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} \dots \right. \\ \left. + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k})} \cdot \psi_{k+1} \right) - \left(\frac{B(cc_k, Y_{i,k}) \dots}{+ 2 \cdot \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2}} \right) \cdot Y_{i,k} \dots \\ + \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot DDp1$$

$$DD_{i,k+1} \leftarrow Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}, Y_{i,k}) + D(cc_k, Y_{i,k}) + DDp)$$

$$P_{0,k+1} \leftarrow -\frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$$

$$q_{0,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}$$

for $i \in 1, 2 \dots N_x - 1$

$$P_{i,k+1} \leftarrow \frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

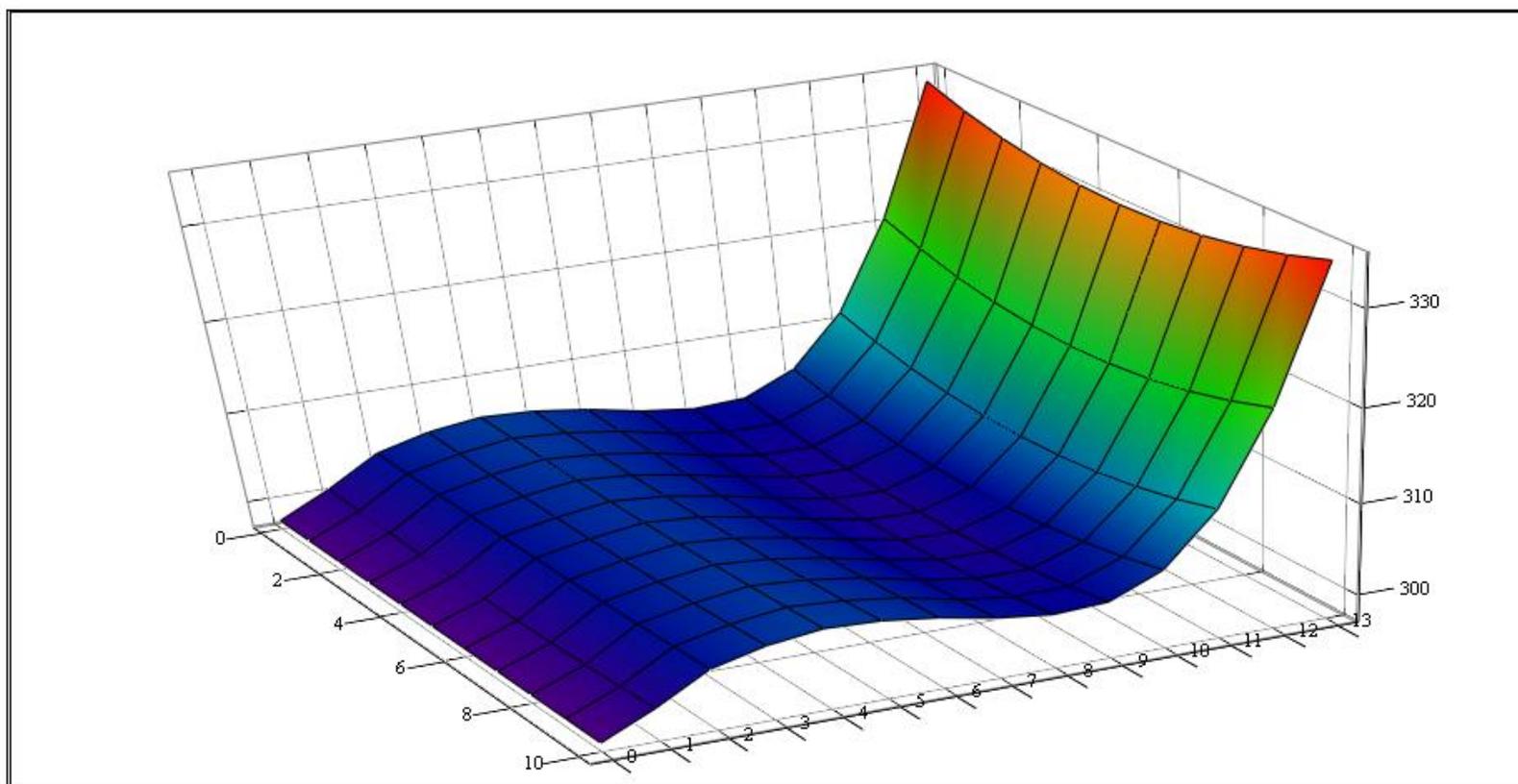
$$q_{i,k+1} \leftarrow \frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$Y_{N_x,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot CC_{N_x,k+1} \cdot \psi_{2k+1} - \lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [DD_{N_x,k+1} - q_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}{-\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [BB_{N_x,k+1} + P_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}$$

for $i \in N_x - 1, N_x - 2 \dots 0$

$$\left[\begin{array}{l} | \\ Y \\ | \end{array} \right] Y_{i,k+1} \leftarrow P_{i,k+1} \cdot Y_{i+1,k+1} + q_{i,k+1}$$

24. Температурное поле по концентрации сухих веществ и радиусу продукта:



25. Значение температур в узловых точках:

$$z = \begin{pmatrix} 298 & 300.65 & 303.77 & 305.19 & 305.9 & 305.63 & 304.84 & 303.7 & 302.98 & 303.26 & 305.66 & 311.16 & 320.71 & 334.41 \\ 298 & 300.41 & 303.67 & 304.94 & 305.72 & 305.32 & 304.54 & 303.26 & 302.45 & 302.53 & 304.71 & 309.93 & 319.29 & 333.02 \\ 298 & 300.23 & 303.59 & 304.77 & 305.55 & 305.12 & 304.26 & 302.96 & 302.02 & 302 & 303.96 & 308.99 & 318.17 & 331.93 \\ 298 & 300.1 & 303.52 & 304.65 & 305.43 & 304.99 & 304.05 & 302.77 & 301.71 & 301.62 & 303.44 & 308.32 & 317.37 & 331.15 \\ 298 & 300.02 & 303.48 & 304.58 & 305.35 & 304.92 & 303.91 & 302.66 & 301.53 & 301.4 & 303.13 & 307.92 & 316.89 & 330.68 \\ 298 & 300 & 303.47 & 304.55 & 305.32 & 304.89 & 303.87 & 302.62 & 301.47 & 301.32 & 303.02 & 307.78 & 316.73 & 330.52 \\ 298 & 300.02 & 303.48 & 304.58 & 305.35 & 304.92 & 303.91 & 302.66 & 301.53 & 301.4 & 303.13 & 307.92 & 316.89 & 330.68 \\ 298 & 300.1 & 303.52 & 304.65 & 305.43 & 304.99 & 304.05 & 302.77 & 301.71 & 301.62 & 303.44 & 308.32 & 317.37 & 331.15 \\ 298 & 300.23 & 303.59 & 304.77 & 305.55 & 305.12 & 304.26 & 302.96 & 302.02 & 302 & 303.96 & 308.99 & 318.17 & 331.93 \\ 298 & 300.41 & 303.67 & 304.94 & 305.72 & 305.32 & 304.54 & 303.26 & 302.45 & 302.53 & 304.71 & 309.93 & 319.29 & 333.02 \\ 298 & 300.65 & 303.77 & 305.19 & 305.9 & 305.63 & 304.84 & 303.7 & 302.98 & 303.26 & 305.66 & 311.16 & 320.71 & 334.41 \end{pmatrix}$$

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР
с использованием метода конечных разностей по неявной схеме

ОБЪЕКТ СУШКИ: ЯИЧНЫЙ МЕЛАНЖ
СПОСОБ СУШКИ: КОНВЕКТИВНАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА (ПРЯМОТОК И ПЕРЕКРЕСТНЫЙ ТОК)
Единицы измерения - система СИ

Исходные данные:

1. Диаметр распыленной частицы, м

$X_n := 0$ - координата поверхности частицы

$X_k := 20 \cdot 10^{-6}$ - координата поверхности частицы

$d_e := X_k$ - диаметр частицы

2. Начальная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_n := 0.25$

3. Конечная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_k := 0.915$

4. Скорость движения сушильного агента относительно частицы, м/с

$w_v := 1$

5. Температура сушильного агента, К

$T := 458$ $T_{sr} := T$

6. Плотность сушильного агента, кг/м³

$\rho_v := 1.293$

7. Коэффициент теплопроводности сушительного агента, Вт/(м К)

$$\lambda_v := 0.031$$

8. Динамическая вязкость сушительного агента, м²/с

$$\mu_v := 17.3 \cdot 10^{-6}$$

9. Давление в сушительной камере, Па

$$P_v := 101308.0$$

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ:

Единицы измерения результатов расчета - система СИ

10. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:

$$\alpha := 0.123 \cdot \left(\rho_v \cdot \frac{w_v \cdot d_e}{\mu_v} \right)^{0.83} \cdot \frac{\lambda_v}{d_e}$$

ζ - текущая концентрация сухих веществ

11. Плотность для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\begin{aligned} \rho(\zeta, t) := & \left(-0.02477948 \cdot t^2 + 16.45422863 \cdot t - 2877.07598118 \right) (1 - \zeta)^2 \dots \\ & + \left(0.02727754 \cdot t^2 - 17.52723521 \cdot t + 2669.50472105 \right) (1 - \zeta) \dots \\ & + \left(-0.00593494 \cdot t^2 + 3.27538496 \cdot t + 785.05342441 \right) \end{aligned}$$

12. Коэффициент теплопроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\lambda(\zeta, t) := \left(0.00008857 \cdot t^2 - 0.05527926 \cdot t + 9.48766531\right) (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(-0.00006228 \cdot t^2 + 0.03942148 \cdot t - 6.28777592\right) (1 - \zeta) \dots \\ + \left(0.00000493 \cdot t^2 - 0.00277743 \cdot t + 0.41555978\right)$$

13. Массовая теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cm(\zeta, t) := 2407.273 \cdot (1 - \zeta) + 1774.727$$

14. Объемная теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cr(\zeta, t) := \rho(\zeta, t) \cdot cm(\zeta, t)$$

15. Коэффициент температуропроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

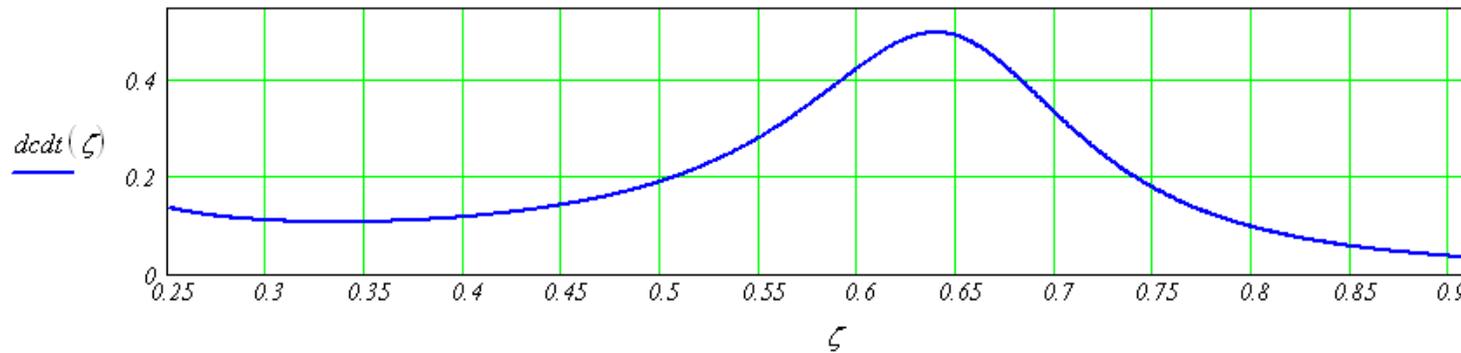
$$a'(\zeta, t) := \frac{\lambda(\zeta, t)}{cr(\zeta, t)}$$

16. Кинетические коэффициенты зависимости скорости сушки:

$$ak := 131.1594 \quad bk := -269.0060 \quad ck := 188.7137 \quad dk := -57.7708$$

17. Зависимость скорости сушки

$$dcdt(\zeta) := \frac{-1}{\left[4 \cdot ak \cdot (1 - \zeta)^3 + 3 \cdot bk \cdot (1 - \zeta)^2 + 2 \cdot ck \cdot (1 - \zeta) + dk\right]}$$



18. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход для свободной влаги:

$$r1(\xi, t) := 3118.4581 \cdot 10^3 - 2286.66 \cdot t$$

19. Эмпирические коэффициенты:

$$a := 1.4906758 \quad b := -442.0545575 \quad c := -0.2663733 \quad d := 95.5221898$$

$$e := 0.0189544 \quad f := -3.2470631 \quad g := -0.0001196 \quad h := 0.0407289$$

20. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом в гигроскопической области:

$R := 8.314$ - универсальная газовая постоянная

$$r2(\xi, t) := r1(\xi, t) - 55.55555 \cdot \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \xi)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \xi)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \xi) + (g \cdot t + h) \right] \right] \dots$$

$$+ 55.55555 \cdot \left[-t \cdot \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \xi)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \xi)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \xi) + (g \cdot t + h) \right] \right] \right]$$

21. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом:

$Wg := 0.171$ - гигроскопическая влажность

$$Cg := 1 - Wg \quad Cg = 0.82900$$

$$r(\zeta, t) := \text{if}(\zeta < Cg, r1(\zeta, t), r2(\zeta, t))$$

22. Температурный коэффициент

$$D'(\zeta, t) := \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$K(\zeta, t) := \frac{d}{d\zeta} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$\delta(\zeta, t) := D'(\zeta, t) \cdot K(\zeta, t)$$

23. Решение методом конечных разностей уравнения теплопереноса:

$$A(\zeta, t) := \frac{k' a'(\zeta, t)}{dc dt(\zeta)} \quad B(\zeta, t) := 0 \quad D(\zeta, t) := \left(\frac{-\rho(\zeta, t) r(\zeta, t)}{cr(\zeta, t) \cdot k''} \right)$$

Число узлов сетки по концентрации и радиусу частицы

$$Nc := 13 \quad Nk := 10 \quad i := 0, 1 \dots Nk \quad k := 0, 1 \dots Nc$$

Значение шага сетки по концентрации и радиусу частицы

$$\tau := \frac{C_k - C_n}{Nc} \quad h := \frac{X_k - X_n}{Nk} \quad x_i := X_n + ih \quad cc_k := C_n + k \cdot \tau$$

$$z := \left[\begin{array}{l} \text{for } k \in 0, 1 \dots Nc \\ \left| \begin{array}{l} P_{0,k} \leftarrow 0 \\ q_{0,k} \leftarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right]$$

```

|  $\psi_k \leftarrow 0$ 
|  $\psi2_k \leftarrow 0$ 
for  $i \in 0, 1 \dots Nx$ 
|  $Y_{i,0} \leftarrow 298$ 
|  $P_{i,0} \leftarrow 0$ 
|  $q_{i,0} \leftarrow 0$ 
for  $k \in 0, 1 \dots Nc - 1$ 
|  $pom \leftarrow \alpha \cdot \left( \frac{T_{sr} - Y_{0,k}}{T_{sr}} \right)^{0.25} \cdot (T_{sr} - Y_{0,k})$ 
|  $\psi_{k+1} \leftarrow pom$ 
|  $\psi2_{k+1} \leftarrow pom$ 
for  $i \in 0, 1 \dots Nx$ 
|  $AA_{i,k+1} \leftarrow \frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h}$ 
|  $BB_{i,k+1} \leftarrow \left( \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{2} \right) \cdot \tau + 1$ 
|  $CC_{i,k+1} \leftarrow AA_{i,k+1}$ 
|  $DDp1 \leftarrow \text{if} \left( i < Nx, Y_{i+1,k}, Y_{Nx,k} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{Nx,k})} \cdot \psi2_{k+1} \right)$ 

```

$$DDp \leftarrow \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot \text{if} \left(i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} \dots \right. \\ \left. + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k})} \cdot \psi_{k+1} \right) - \left(\frac{B(cc_k, Y_{i,k}) \dots}{+ 2 \cdot \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2}} \right) \cdot Y_{i,k} \dots \\ + \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot DDp1$$

$$DD_{i,k+1} \leftarrow Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}, Y_{i,k}) + D(cc_k, Y_{i,k}) + DDp)$$

$$P_{0,k+1} \leftarrow \frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$$

$$q_{0,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}$$

for $i \in 1, 2 \dots N_x - 1$

$$P_{i,k+1} \leftarrow \frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

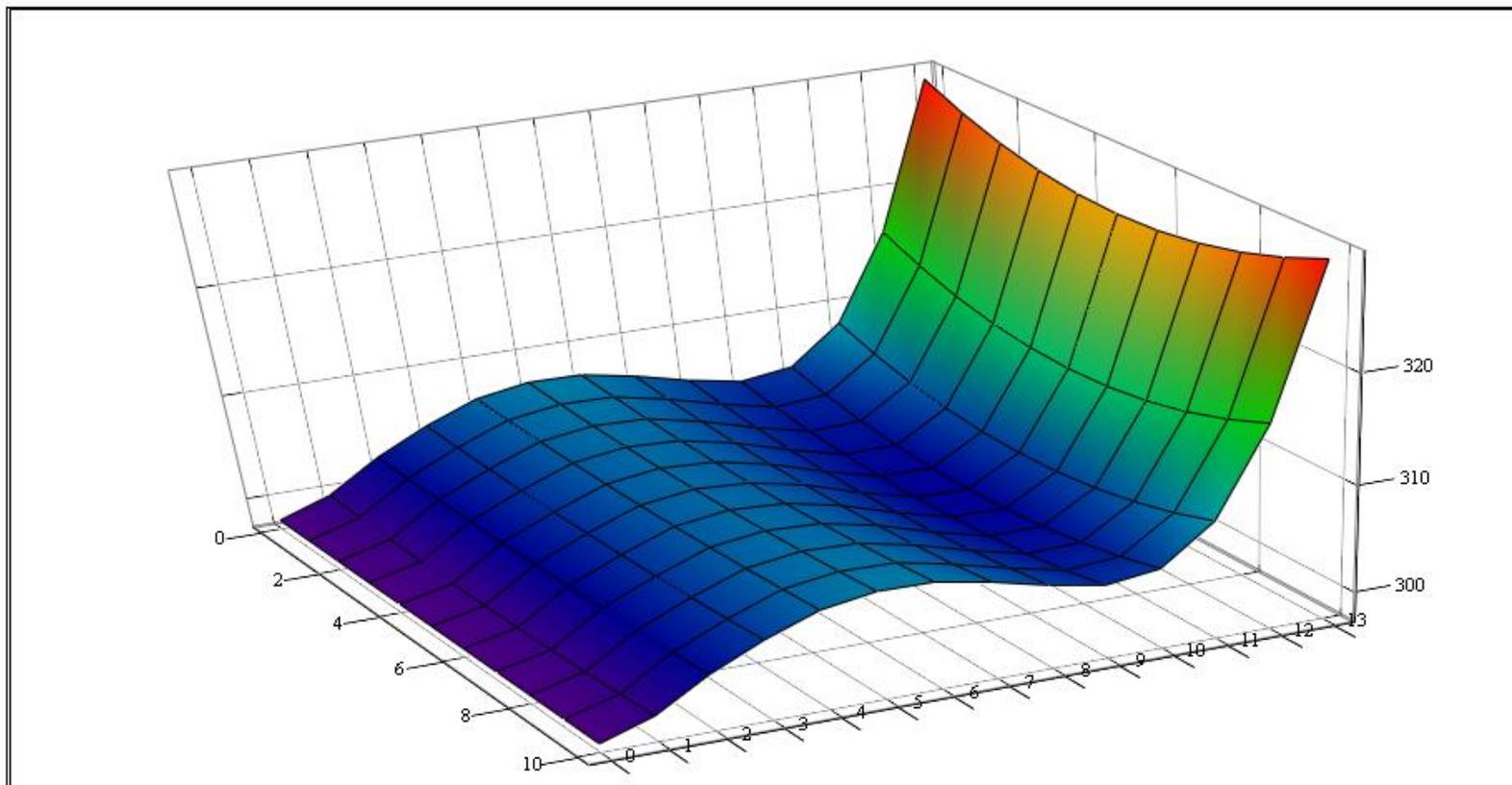
$$q_{i,k+1} \leftarrow \frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$Y_{N_x,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot CC_{N_x,k+1} \cdot \psi_{2k+1} - \lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [DD_{N_x,k+1} - q_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}{-\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [BB_{N_x,k+1} + P_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}$$

for $i \in N_x - 1, N_x - 2 \dots 0$

$$\left[\begin{array}{l} | \\ | \\ Y \end{array} \right] \quad Y_{i,k+1} \leftarrow P_{i,k+1} \cdot Y_{i+1,k+1} + q_{i,k+1}$$

24. Температурное поле по концентрации сухих веществ и радиусу продукта:



25. Значение температур в узловых точках:

$$z = \begin{pmatrix} 298 & 299.63 & 302.5 & 304.74 & 306.54 & 307.31 & 307.23 & 306.28 & 305.05 & 304.11 & 304.72 & 308.23 & 316.17 & 329.4 \\ 298 & 299.42 & 302.37 & 304.53 & 306.33 & 307.03 & 306.91 & 305.85 & 304.54 & 303.42 & 303.79 & 306.99 & 314.65 & 327.86 \\ 298 & 299.26 & 302.26 & 304.37 & 306.16 & 306.82 & 306.65 & 305.55 & 304.12 & 302.91 & 303.08 & 306.03 & 313.46 & 326.66 \\ 298 & 299.15 & 302.18 & 304.25 & 306.03 & 306.69 & 306.45 & 305.36 & 303.83 & 302.56 & 302.57 & 305.35 & 312.62 & 325.79 \\ 298 & 299.08 & 302.13 & 304.19 & 305.96 & 306.61 & 306.33 & 305.25 & 303.65 & 302.34 & 302.27 & 304.95 & 312.11 & 325.27 \\ 298 & 299.06 & 302.12 & 304.17 & 305.93 & 306.58 & 306.29 & 305.21 & 303.59 & 302.27 & 302.17 & 304.81 & 311.94 & 325.09 \\ 298 & 299.08 & 302.13 & 304.19 & 305.96 & 306.61 & 306.33 & 305.25 & 303.65 & 302.34 & 302.27 & 304.95 & 312.11 & 325.27 \\ 298 & 299.15 & 302.18 & 304.25 & 306.03 & 306.69 & 306.45 & 305.36 & 303.83 & 302.56 & 302.57 & 305.35 & 312.62 & 325.79 \\ 298 & 299.26 & 302.26 & 304.37 & 306.16 & 306.82 & 306.65 & 305.55 & 304.12 & 302.91 & 303.08 & 306.03 & 313.46 & 326.66 \\ 298 & 299.42 & 302.37 & 304.53 & 306.33 & 307.03 & 306.91 & 305.85 & 304.54 & 303.42 & 303.79 & 306.99 & 314.65 & 327.86 \\ 298 & 299.63 & 302.5 & 304.74 & 306.54 & 307.31 & 307.23 & 306.28 & 305.05 & 304.11 & 304.72 & 308.23 & 316.17 & 329.4 \end{pmatrix}$$

Общество с ограниченной
ответственностью «АСТРБИОПРОДУКТ»

ООО «АСТРБИОПРОДУКТ»
414042, Астрахань, Флеминга, 39
ИНН 3023000098, КПП 302301001
Р/сч 40702810217130000119
Банк Астраханский РФ ОАО
«Россельхозбанк», г. Астрахань
Кор/сч 30101810400000000757
БИК 041203757

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «АСТРБИОПРОДУКТ»,
кандидат технических наук



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ
НАУК В ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО**

соискателя кафедры «Технологические машины и оборудование»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Астраханский государственный
технический университет» (ФГБОУ ВПО «АГТУ»)

ГУБА ОКСАНЫ ЕВГЕНЬЕВНЫ

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы Губа Оксаны Евгеньевны, выполненные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной совершенствованию и научному обоснованию способа сушки яичных продуктов внедрены и используются на ООО «АСТРБИОПРОДУКТ» для совершенствования технологических процессов на предприятии. Результаты диссертационной работы также используются при организации научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на предприятии.

Объекты внедрения:

1. Экспериментальные данные по физико-химическим, гигроскопическим и теплофизическим характеристикам яичных концентратов.
2. Режимные параметры для распылительной сушки яичных продуктов.
3. Алгоритм разработки комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки.
4. Конструкция распылительной сушилки для комбинирования рациональных режимов.
5. Математическая модель тепломассопереноса при распылительной сушке яичных продуктов.

Использование указанных результатов позволяет: повысить качество проектирования и эффективность эксплуатации технологических установок; сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натурных испытаний.


/О.Е. Губа/
« 10 » сентября 2015г.

ООО «АСТРБИОПРОДУКТ»
Инженер-технолог,
кандидат технических наук

/Л.М. Титова /
« 10 » сентября 2015г.

Общество с ограниченной ответственностью
научно-производственное предприятие
«Золотое Зёрнышко»
(ООО НПП «Золотое Зёрнышко»)

414042, г. Астрахань, ул. Флеминга, д. 39.
416310, Астраханская область, Камызякский р-н,
с. Бирючек, ул. Степная, д. 19
Телефон +79299305630
E-mail: amed-nauka@yandex.ru

ИНН 3023001302, КПП 302301001,
ОГРН 111302300320

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО НПП «Золотое Зёрнышко»



Р.Л. Жаквалиев
2015г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК В ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

соискателя кафедры «Технологические машины и оборудование»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Астраханский государственный
технический университет» (ФГБОУ ВПО «АГТУ»)

ГУБА ОКСАНЫ ЕВГЕНЬЕВНЫ

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательских работ Губа Оксаны Евгеньевны, полученные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной совершенствованию и научному обоснованию способа сушки яичных продуктов, применены на ООО НПП «Золотое зернышко» при модернизации технологической линии по производству сухих яичных продуктов и при проведении НИОКР на предприятии.

Объекты внедрения:

1. Экспериментальные данные по физико-химическим, гигроскопическим и теплофизическим характеристикам яичных концентратов.
2. Режимные параметры для распылительной сушки яичных продуктов.
3. Алгоритм разработки комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки.
4. Конструкция распылительной сушилки для комбинирования рациональных режимов.
5. Математическая модель тепломассопереноса при распылительной сушке яичных продуктов.

Использование указанных результатов позволяет: повысить качество проектирования и эффективность эксплуатации технологических установок; сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натурных испытаний. Алгоритм получения комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки и реализация предложенных мероприятий позволяет при соответствующей модернизации распылительной сушильной техники увеличить производительность и термический коэффициент полезного действия.

Предложенный способ 2-х зонной распылительной сушки яичных продуктов, рациональные режимные параметры и конструкция сушильной установки приняты к внедрению на ООО НПП «Золотое зернышко». Ожидаемый экономический эффект от промышленного внедрения составит 5230 тыс.руб./год.


/О.Е. Губа/
« 11 » февраля 2015г.

Заместитель директора
ООО НПП «Золотое Зёрнышко»,
кандидат технических наук

/Э.П. Дяченко/
« 11 » февраля 2015г.

Главный технолог
ООО НПП «Золотое Зёрнышко»,

/Н.П. Дяченко/
« 11 » февраля 2015г.

Главный бухгалтер
ООО НПП «Золотое Зёрнышко»

/Т.Г. Васильева/
« 11 » февраля 2015г.

Общество с ограниченной
ответственностью научно-
производственное предприятие
«пЕДАнт» (ООО НПП «пЕДАнт»)
414006, г. Астрахань, Бакинский пер., 52
ИНН 3023001729, КПП 302301001
Р/сч 40702810505000020763
Банк Отделение № 8624
Сбербанка России, г. Астрахань
Кор/сч 30101810500000000602
БИК 041203602

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО НПП «пЕДАнт»,
кандидат технических наук

Александр Николаевич
А.Н.Х. Нугманов/
«пЕДАнт» 2015г.
М.П.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ
НАУК В ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО**

соискателя кафедры «Технологические машины и оборудование»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Астраханский государственный
технический университет» (ФГБОУ ВПО «АГТУ»)

ГУБА ОКСАНЫ ЕВГЕНЬЕВНЫ

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы Губы Оксаны Евгеньевны, выполненные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной совершенствованию и научному обоснованию способа сушки яичных продуктов внедрены и используются на ООО НПП «пЕДАнт» для совершенствования технологических процессов на предприятии. Результаты диссертационной работы также используются при организации научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на предприятии.

Объекты внедрения:

1. Экспериментальные данные по физико-химическим, гигроскопическим и теплофизическим характеристикам яичных концентратов.
2. Режимные параметры для распылительной сушки яичных продуктов.
3. Алгоритм разработки комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки.

4. Конструкция распылительной сушилки для комбинирования рациональных режимов.

5. Математическая модель тепломассопереноса при распылительной сушке яичных продуктов.

Использование указанных результатов позволяет: повысить качество проектирования и эффективность эксплуатации технологических установок; сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натурных испытаний.

Предложенный способ 2-х зонной распылительной сушки яичных продуктов, рациональные режимные параметры и конструкция сушильной установки приняты к внедрению на ООО НПП «пЕДАНт». Ожидаемый экономический эффект от промышленного внедрения составит 4800 тыс.руб./год.

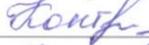

/О.Е. Губа/
« 12 » февраля 2015г.

ООО НПП «пЕДАНт»

Главный бухгалтер


/Е.В. Фоменко/
« 12 » февраля 2015г.

Инженер-технолог


/А.М. Коптеева /
« 12 » февраля 2015г.

Общество с ограниченной ответственностью
**«АСТРАХАНСКАЯ КОНСЕРВНАЯ
КОМПАНИЯ»**

Адрес: 414052, г Астрахань,
ул. Августовская, д. 1
Телефон: (8512) 259023
ОГРН 1073019001021
ИНН 3009015141

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор
ООО «АСТРАХАНСКАЯ
КОНСЕРВНАЯ КОМПАНИЯ»



/Р.Р. Иргалиев/
2015г.

М.П.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
В ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО**

соискателя кафедры «Технологические машины и оборудование»

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Астраханский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВПО «АГТУ»)

ГУБА ОКСАНЫ ЕВГЕНЬЕВНЫ

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы Губа Оксаны Евгеньевны, выполненные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной совершенствованию и научному обоснованию способа сушки яичных продуктов внедрены и используются на ООО «АСТРАХАНСКАЯ КОНСЕРВНАЯ КОМПАНИЯ» для совершенствования технологических процессов на предприятии.

Результаты диссертационной работы используются при организации научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на предприятии с целью разработки и дальнейшего внедрения перспективных инновационных технологий для эффективного производства пищевых товаров массового потребления.

Объекты внедрения:

1. Экспериментальные данные по физико-химическим, гигроскопическим и теплофизическим характеристикам яичных концентратов.
2. Алгоритм разработки комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки.
3. Конструкция распылительной сушилки для комбинирования рациональных режимов.

ООО «АСТРАХАНСКАЯ
КОНСЕРВНАЯ КОМПАНИЯ»
Главный инженер


/О.Е. Губа/
«02» 03 2015г.


/А.М. Терентьев/
«02» 03 2015г.