

На правах рукописи



ГУБА Оксана Евгеньевна

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

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты
пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Астрахань
2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «АГТУ»).

- Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Алексаян Игорь Юрьевич
- Официальные оппоненты - **Рудобашта Станислав Павлович**
Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
(ФГБОУ ВО «Московский государственный аграрный университет имени К.А. Тимирязева РГАУ-МСХА»), профессор кафедры «Теплотехника, гидравлика и энергообеспечение предприятий»
Прибытков Алексей Викторович
кандидат технических наук, доцент
(ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»), доцент
- Ведущая организация - **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)» (ФГБОУ ВО «КемТИПП», г. Кемерово)**

Защита состоится «30» июня 2015 года в 11 часов 00 мин на заседании диссертационного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 212.035.01 при ФГБОУ ВПО «ВГУИТ» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

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

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети «Интернет» на официальном сайте ФГБОУ ВПО «ВГУИТ» <http://www.vsu.ru> «23» марта 2015 г.

Автореферат размещен в сети «Интернет» на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ по адресу: <https://vak2.ed.gov.ru> и на официальном сайте ФГБОУ ВПО «ВГУИТ» <http://www.vsu.ru> « 27 » апреля 2015 г.

Автореферат разослан « 18 » мая 2015 г.

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



Л.Н. Фролова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Пищевая промышленность РФ 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.

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 разнообразные 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 и совершенствовать технологии производства. Совершенствованию операции сушки на яйцеперерабатывающих предприятиях уделяется большое внимание, так как данная стадия достаточно энергоемка, в значительной степени определяет стоимость и оказывает влияние на качественные показатели продукции.

Решение задач экономии энергии и повышения эффективности перерабатывающих предприятий при производстве сухих яичных продуктов, в частности, проведение дополнительных комплексных исследований с целью выбора рациональных 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.) и в соответствии с координационным планом Научно-исследовательской работы кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет».

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

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

В соответствии с поставленной целью решаются следующие задачи:

1. Определить 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.
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 теплопереноса 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 теплообмена с учетом целевого исследования данных научно-технической литературы предложить конструкторские решения для реализации разработанных режимов сушки.
8. Разработать рекомендации по практическому использованию результатов исследования.

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.

Научная новизна. Получены уравнения зависимости гигроскопических, массовлагодобменных 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.

Практическая ценность. 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», ГП АО «СХП Птицефабрика «Степная», ООО НПП «Золотое зернышко», ООО НПП «пЕДАнт», ООО «АСТРБИОПРОДУКТ» и др.

Апробация работы. 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.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи в журналах рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов и заключения, списка литературы и приложений. Основное содержание работы изложено на 155 страницах машинописного текста, содержит 44 таблиц, 87 рисунков, список литературы из 164 наименований работ отечественных и зарубежных авторов. Приложения представлены на 72 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность исследований.

В первой главе рассмотрены основные тенденции потребления, перспективы производства и области использования яичных продуктов. Приведена общая характеристика яичных продуктов, проанализированы требования к сырью и качеству готовой продукции. Представлены результаты анализа современных технологии переработки яичных продуктов и перспективных способов сушки яичных продуктов. Проанализированы конструкторские решения в области распылительной сушки. Намечены пути интенсификации теплообмена при обезвоживании яичных продуктов. Поставлена цель и сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе изложены результаты исследований статистики процесса обезвоживания и свойств яичных продуктов как объектов сушки. Для научного анализа кинетики и динамики теплообменных процессов их моделирования и оптимизации, изучены и систематизированы теплофизические характеристики яичных продуктов. Получены зависимости плотности ρ , удельной теплоемкости c , коэффициента температуропроводности a и коэффициента теплопроводности λ от температуры T и влажности W яичных продуктов в реальных диапазонах их изменения в процессе обезвоживания (таблица 1).

Таблица 1 – Диапазоны изменения влажности и температуры яичных продуктов

Продукт	W , кг/кг	T , К
Белок	$0,882 \div 0,09$	$278 \div 333$
Желток	$0,54 \div 0,05$	$278 \div 333$
Меланж	$0,75 \div 0,085$	$278 \div 333$

Выполнены эксперименты по определению плотности белка $\rho_{б}$, желтка $\rho_{ж}$ и меланжа $\rho_{м}$ и получены функциональные зависимости. На рисунке 1, в качестве примера, приведены поля значений плотности желтка и меланжа. Из анализа результатов следует, что существенное влияние на плотность оказывает изменение влажности, что связано изменением доли воды. Влияние температуры, в реальном диапазоне ее изменения (рисунок 1) на плотность незначительно. Зависимость плотности от W (рисунок 1) носит нелинейный характер, что объясняется: физико-химическим связыванием влаги силами адсорбции в области высокой W и связыванием влаги в пространственных структурах при уменьшении W . Зависимости удельной теплоемкости получены по правилу аддитивности с использованием литературных данных: белка $c_{б}(W) = 2361,538 \cdot W + 1820,462$; желтка $c_{ж}(W) = 2167,308 \cdot W + 2014,692$ и меланжа $c_{м}(W) = 2407,273 \cdot W + 1774,727$.

При увеличении W для продуктов наблюдается увеличение удельной теплоемкости с постепенным приближением значений в области высокой W к теплоемкости воды. Для экспериментального определения теплопроводности λ яйцепродуктов использован метод линейного источника тепла (цилиндрического зонда постоянной мощности) и получены функциональные зависимости. На рисунке 2, в качестве примера, приведены поля значений λ для меланжа.

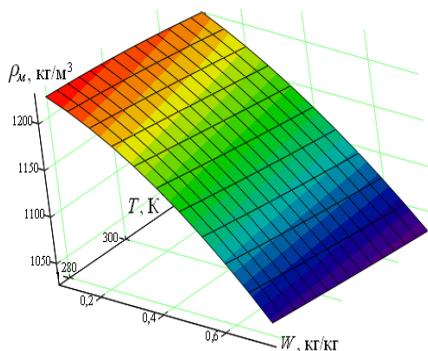


Рисунок 1 – Поля значений плотности меланжа

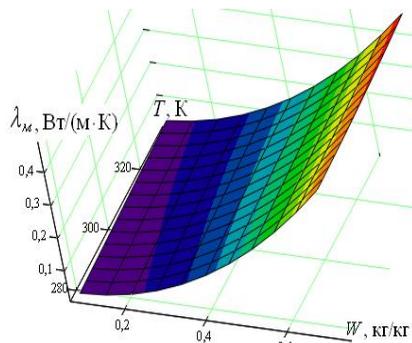


Рисунок 2 – Поля значений теплопроводности меланжа

Зависимости теплопроводности от влажности и температуры яичных продуктов носят нелинейный характер, что характерно для большинства продуктов животного происхождения. С учетом ранее полученных функциональных зависимостей определены коэффициенты температуропроводности: $a = \lambda / (c \cdot \rho)$.

Проведена систематизация и обобщение данных по теплофизическим характеристикам яичных концентратов для диапазонов изменения W и T .

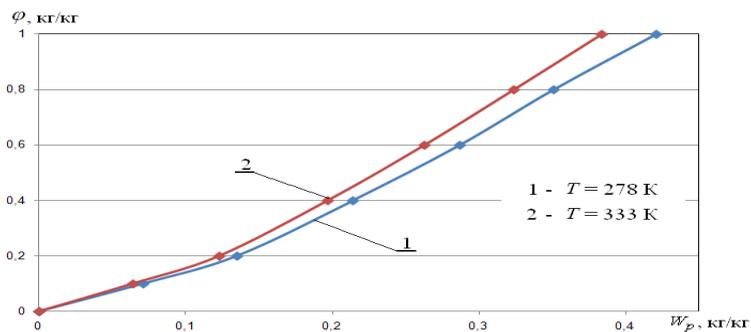


Рисунок 3 – Изотермы сорбции водяного пара белком

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 теплообменных процессов, что необходимо учитывать при разработке рациональных способов влагоудаления и конструкторских решений для их осуществления. Исследовались гигроскопические свойства яичного белка, желтка и меланжа. Исследования проводились тензиметрическим методом Ван Бамелена. Образцы материала с заранее определенным влажностью выдерживались в эксикаторах над водным раствором серной кислоты (до достижения постоянной массы), при этом каждой концентрации растворов соответствовало при данной температуре T

определенное значение относительной влажности воздуха φ в эксикаторе и рассчитывалась равновесная влажность W_p . Для построения изотерм сорбции (рисунок 3) и определения гигроскопической влажности использовались экспериментальные образцы в виде порошков, полученные сушкой распылением.

Изотермы сорбции указывают на малую зависимость сорбционной способности яичных продуктов от T . С повышением T равновесная влажность W_p уменьшается, что характерно для большинства биополимерных систем.

По виду изотерм сорбции, согласно классификации предложенной А.В. Лыковым, яичные продукты можно отнести к группе капиллярно-пористых коллоидных тел, в которых для жидкости характерны различные формы связи влаги с твердым скелетом, присущие как капиллярно-пористым, так и коллоидным телам.

Таблица 2 – Равновесные гигроскопические влажности яичных продуктов W_p , кг/кг

Продукт	$T=278\text{K}$	$T=333\text{K}$	Продукт	$T=278\text{K}$	$T=333\text{K}$	Продукт	$T=278\text{K}$	$T=333\text{K}$
Белок	0,421	0,384	Желток	0,131	0,122	Меланж	0,194	0,171

W_p при $\varphi=1\text{кг/кг}$ соответствуют гигроскопическим (таблица 2). Отсутствие резких перегибов изотерм указывает на превалирование свойств ограниченно набухающих коллоидных тел. Гигроскопическая влажность желтка и меланжа, значительно меньше, чем у белка, ввиду присутствия в них гидрофобных жиров.

На основе анализа процесса сорбции паров воды яичными продуктами целесообразно рекомендовать влажность $W_k = 0,09$ кг/кг – белок, $W_k = 0,05$ кг/кг – желток и $W_k = 0,085$ – меланж, в качестве конечной при сушке (мономолекулярный адсорбционный слой) для последующего длительного хранения, что соответствует ГОСТ Р 53155-2008. На участках изотерм $W_p \leq 0,1$ кг/кг для белка, $W_p \leq 0,04$ кг/кг для желтка и $W_p \leq 0,07$ кг/кг для меланжа (рисунок 3) сорбционная способность продуктов практически не зависит от температуры. При сорбции паров воды на этих участках формируются энергетически прочные гидратные комплексы за счет адсорбции сольватных молекул жидкости молекулами внешней и внутренней поверхности мицелл продуктов, происходит образование слоя мономолекулярной адсорбции. При $\varphi = 0,8$ кг/кг наблюдается плавный перегиб изотерм, что указывает на наличие жидкости в объеме микро- и макрокапилляров, пор за счет эффекта смачивания. На изотермах можно выделить три характерных участка (таблицы 3 и 4).

1-ые участки изотерм соответствуют образованию слоя мономолекулярной адсорбции. При поляризации последующих слоев предыдущими молекулы воды продолжают находиться в ориентированном состоянии. На 2-ых участках 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 характерно наличие жидкости в объеме микро- и макрокапилляров, пор за счет эффекта смачивания без выделения тепла.

Таблица 3 – 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 4 – 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

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 продукции следует выполнять в герметичной упаковке и/или в складских помещениях при надлежащей влажности воздуха.

Получены аппроксимирующие функциональные зависимости φ от W_p и T :

$$\varphi(W_p, T) = (a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h), \quad (1)$$

где a, b, c, d, e, f, g, h – эмпирические коэффициенты.

Разность химических потенциалов переноса влаги $\Delta\mu$ является движущей силой сорбции и в гигроскопической области равна энергии связи влаги с материалом E , которую можно принять потенциалом влагопереноса:

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

Изменение свободной энергии определим путем дифференцирования уравнения Гиббса-Гельмгольца ($\Delta F = \Delta E - T \cdot \Delta S$, где $T \cdot \Delta S$ – изменение связанной энергии; ΔS – изменение энтропии.) по W_p при $T, P = const$:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}\right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P} \quad (2).$$

При дифференцировании выражения (2) по T получаем:

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

С учетом выражения (1) имеем зависимость для дифференциального изменения энтропии связанной воды: $\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P} = -\partial(R \cdot T \cdot \ln \varphi) / \partial T$ (3).

Зная $\varphi(W_p, T)$ для белка, желтка и меланжа определим численные значения свободной энергии $\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}\right)_{T,P}$, связанной энергии $-T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P}$ и внутренней энергии (теплового эффекта) $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}\right)_{T,P}$ процесса сорбции (рисунок 4).

Отрицательное значение $(\partial\Delta F/\partial W_p)_{T,P}$ во всем диапазоне W_p (рисунок 4 – показано для меланжа), указывает на высокую гигроскопичность яичных продуктов. Изменение энтропийной составляющей по W_p обусловлено стремлением системы к термодинамическому равновесию. Дифференциальное изменение внутренней энергии по W_p отрицательно, т.е. присутствуют тепловые эффекты при сорбции паров воды яичными продуктами. Характер зависимостей типичен для большинства биополимерных систем.

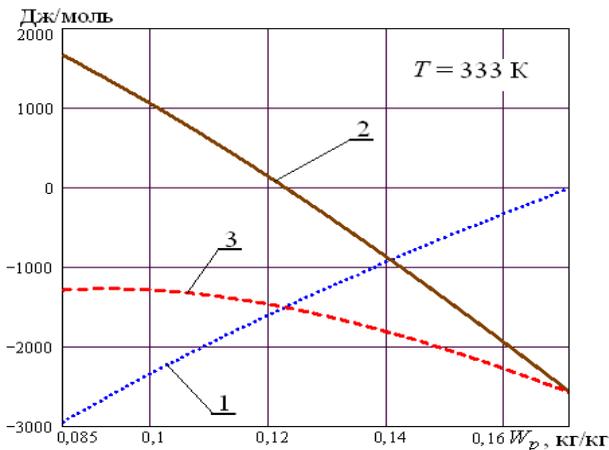


Рисунок 4 – Зависимости дифференциального изменения свободной энергии (1), связанной энергии (2) и теплового эффекта (3) сорбции от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды меланжем

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. С учетом (1) и (3) можно определить количество тепловой энергии, необходимое для испарения 1кг влаги:

$$r = r' + r_{см} + r_{эм} = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T - 55, (5) \cdot R \cdot T \cdot \ln \varphi + (4). \\ + 55, (5) \cdot T \cdot (\partial \Delta S / \partial W_p)$$

Для анализа движущих сил в процессе сорбции с целью выбора рациональных режимов энергоподвода получена функциональная зависимость термоградиентного коэффициента δ_p от W_p и T :

$$\delta_p = (\partial(R \cdot T \cdot \ln \varphi) / \partial T)_{W_p} \cdot ((\partial(R \cdot T \cdot \ln \varphi) / \partial W_p)_{T})^{-1}.$$

Максимум функции $\delta_p = f(W_p)$ соответствует границе между коллоидно-связанной и «свободной» влагой (макро- и микрокапилляров, пор, осмотической). До максимального значения функции $\delta_p = f(W_p)$ монотонно возрастает (рисунок 5 – для белка), что указывает на перемещение влаги прежде всего в виде пара.

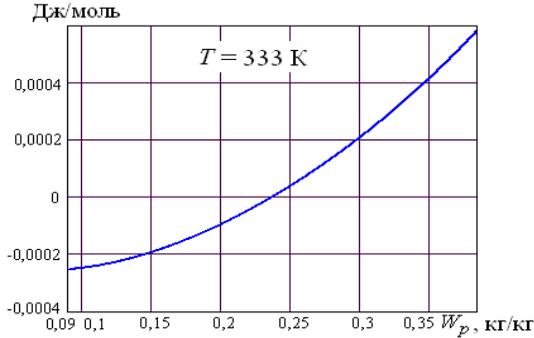


Рисунок 5 – Зависимости $\delta_p = f(W_p)$ в процессе сорбции паров воды белком

Сделан вывод, что для интенсификации сушки яичных продуктов целесообразно увеличение поверхности тепломассообмена диспергированием продукта и использование объемных способов энергоподвода.

В третьей главе представлены результаты изучения механизма внутреннего тепломассопереноса при сушке яичных продуктов на основе исследования кинетики процесса. 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 на установке, разработанной на кафедре «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО «АГТУ».

В ходе экспериментов производился отбор проб капель продукта из зоны сушки путем их улавливания на поверхность гидрофобного материала, далее осуществлялась их досушка на аналитических весах. В качестве основных факторов, влияющих на эффективность процесса сушки были приняты: температура сушильного агента $T_{с.а.} = 423.473\text{K}$ и начальная температура продукта $T_{прод} = 278.298\text{K}$. Границы варьирования факторов установлены из технологических ограничений и возможностей технической реализации экспериментального процесса сушки. Остальные факторы приняты постоянными и установлены в результате расчетов и серии постановочных экспериментов. Исследования проводились по полному многоуровневому многофакторному плану с помощью вероятностно-статистических методов планирования и обработки данных. Построены кривые сушки и скорости сушки для исследуемых продуктов (рисунок 6 – показано, в качестве примера для белка и меланжа, при $T_{прод} = 278\text{K}$).

С целью получения функциональных зависимостей скорости сушки dW/dt или dc/dt , кг/(кг·с) от влажности W или содержания сухих веществ c , кг/кг ($c = 1 - W$) для яичных продуктов экспериментальные математически описаны полиномиальной зависимостью вида:

$$\tau(W) = a_k \cdot W^4 + b_k \cdot W^3 + c_k \cdot W^2 + d_k \cdot W + e_k, \quad (5)$$

где $\tau(W)$ – время сушки, с; a_k, b_k, c_k, d_k, e_k , – эмпирические коэффициенты.

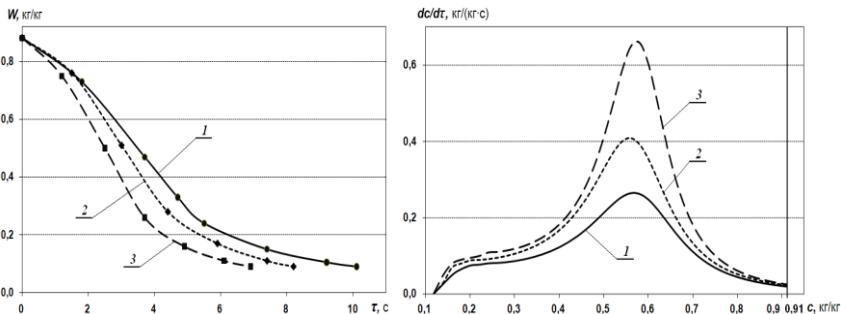


Рисунок 6 – Кривые сушки и скорости сушки белка при $T_{\text{проо}}=278\text{K}$: 1 – при $T_{c.a.}=423\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.}=448\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.}=473\text{K}$

Учитывая формулу связи $W=1-c$, после математических преобразований:

$$dc/d\tau = -1 / \left(4 \cdot a_k \cdot (1-c)^3 + 3 \cdot b_k \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot c_k \cdot (1-c) + d_k \right) \quad (6).$$

Обобщая данные экспериментальных исследований в диапазоне варьирования $T_{c.a.}$:

$$dc/d\tau = -1 / \left[4 \cdot (A_k \cdot T_{c.a.}^2 + B_k \cdot T_{c.a.} + C_k) \cdot (1-c)^3 + 3 \cdot (D_k \cdot T_{c.a.}^2 + E_k \cdot T_{c.a.} + F_k) \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot (G_k \cdot T_{c.a.}^2 + H_k \cdot T_{c.a.} + K_k) \cdot (1-c) + (L_k \cdot T_{c.a.}^2 + M_k \cdot T_{c.a.} + N_k) \right], \quad (7)$$

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.

С целью установления рациональных и/или комбинированных режимов при организации распылительной сушки яичных продуктов используя зависимость (7) можно рассчитывать значения скорости процесса для различных значений факторов.

При интенсивной сушке на характер протекания процесса значительное влияние оказывают процессы формирования капиллярно-пористой структуры материала. Анализ результатов исследований ряда авторов и собственных экспериментов показал, что при распылительной сушке наблюдается два периода обезвоживания, что согласуется с основными положениям теории сушки. На первоначальном этапе процесса рост скорости сушки (рисунок 6) предопределяет превалирование испарения влаги внутрь частицы с образованием пузырьков пара и поверхностной пленки, которая впоследствии сформирует твердую оболочку. Движение влаги через пленку частицы происходит в основном в виде пара. Диффузия пара происходит в виде последовательных процессов конденсации пара и испарения влаги на жидких пленках. 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. Таким образом, в системе уравнений тепло- и массопереноса при моделировании коэффициент фазового превращения ϵ можно принять равным 1. Анализ экспериментальных данных (рисунок 6) 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. Во втором периоде происходит углубление зоны испарения вглубь частицы и при этом оформляется ее твердая структура. 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.

В четвертой главе представлены результаты изучения кинетики процесса и реализована математическая постановка и решены задачи совершенствования и рационализации сушильного процесса. Исследования по рационализации процесса распылительной сушки яичных продуктов проводились на основе данных по кинетике процесса. Дополнительно проводилось тестирование установленных режимов обезвоживания. Для различного сочетания значений влияющих факторов было определено экспериментальное время сушки τ_c до принятой конечной влажности W_k . В качестве целевой функции при рационализации, выбрана удельная производительность, которая соответствует съему сухого продукта с единицы объема камеры в единицу времени Π , кг/(м³·ч). На основе результатов расчетов для исследуемых продуктов получены аппроксимирующие линейно-степенные зависимости Π от влияющих факторов:

$$\Pi(T_{c.a.}, T_{prod}) = (a_{\Pi} \cdot T_{prod} + b_{\Pi}) \cdot T_{c.a.}^2 + (c_{\Pi} \cdot T_{prod} + d_{\Pi}) \cdot T_{c.a.} + (e_{\Pi} \cdot T_{prod} + f_{\Pi}) \quad (8)$$

где a_{Π} , b_{Π} , c_{Π} , d_{Π} , e_{Π} , f_{Π} – эмпирические коэффициенты. Поля значений Π (рисунок 7 – для меланжа).

Верхний предел T_{prod} ограничен на основе анализа результатов предварительных исследований и соответствует температуре в производственных помещениях. Нижний предел $T_{prod}=278K$ соответствует температуре хранения жидких яичных продуктов. С ростом $T_{c.a.}$ удельная производительность Π установки существенно увеличивается, однако при этом увеличивается температура частиц продукта. Термовоздействие, приводящее к перегреву продукта выше 333K снижает качество термолабильных яичных продуктов. На основе анализа качественных показателей получаемых порошков рекомендован верхний предел температуры сушильного агента $T_{c.a.}=523K$. Температурные режимы при сушке важны, и должны устанавливаться индивидуально.

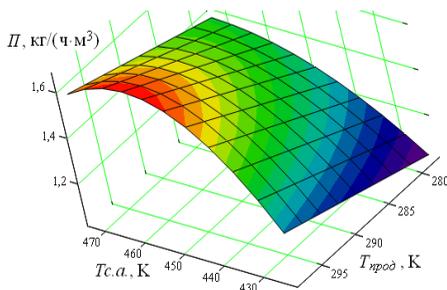


Рисунок 7 – Поля значений удельной производительности при сушке яичного меланжа

Анализ характера полей значений Π показал, что с ростом $T_{c.a.}$ и T_{prod} интенсифицируются массообменные процессы, что приводит к росту Π за счет снижения общей продолжительности сушки. Увеличение Π при увеличении T_{prod} в диапазоне 278..298K очевидно, так как сокращаются затраты на прогрев продукта.

По уравнению (8) с помощью опции «maximize» были определены максимум Π и соответствующие ему рациональное сочетание режимных параметров в среде программного обеспечения Mathcad Professional (таблица 5).

Таблица 5 – Максимум Π , время сушки и рациональные значения варьируемых параметров

Продукт	Π , кг/(м ³ ·ч)	τ_c , с	$T_{c.a.}$, К	$T_{прод.}$, 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 качественных показателей сухих яичных продуктов, полученных при рациональных режимах (таблица 5), показал соответствие образцов требованиям ГОСТ Р 53155-2008 «Продукты яичные жидкие и сухие пищевые».

Разработка комбинированных режимов производилась для решения ряда задач при организации сушки яичных продуктов: повышение Π 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.

Принимая во внимание характер кривых скорости распылительной сушки и наличие характерных участков (рисунок 6) предложена 2-х зонная сушка и определены значения содержания сухих веществ $c_{зр}$, кг/кг, соответствующие границам зон. За границу принято $c_{зр}$, соответствующее максимальной скорости процесса. Максимальное значение скорости сушки $(dc/dt)^{max}$ и $c_{зр}$ для любого сочетания варьируемых $T_{прод}$ и $T_{c.a.}$ можно определить используя зависимости (6) или (7) и опцию «maximize» в среде программного обеспечения Mathcad Professional. Для режимов (таблица 5) в таблице 6 представлены $(dc/dt)^{max}$ и $c_{зр}$.

Таблица 6 – Максимум скорости сушки, время $\tau_c^{зр}$, содержание сухих веществ $c_{зр}$

Продукт	$(dc/dt)^{max}$, кг/(кг·с)	$c_{зр}$, кг/кг	$\tau_c^{зр}$, с
Яичный белок	0,79	0,535	2,168
Яичный желток	0,973	0,718	1,327
Яичный меланж	0,431	0,583	3,117

С помощью (5) при замене $W=1-c$ определено время сушки $\tau_c^{зр}$ до $c_{зр}$, то есть, установлена продолжительность первого периода процесса влагоудаления (таблица 6). 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.

Проведены исследования кинетики 2-х зонной распылительной сушки при рациональных значениях варьируемых параметров (таблица 5). В ходе эксперимента получены кривые сушки, определены эмпирические коэффициенты зависимостей для времени и скорости сушки.

Таблица 7 – Удельная производительность при различной организации процесса сушки

Продукт	Π , кг/(м ³ ·ч)	Π_k , кг/(м ³ ·ч)	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

На основе анализа результатов исследований установлено экспериментальное время сушки до требуемой конечной влажности продуктов и определена удельная производительность сушилки при 2-х зонной сушке Π_k . В таблице 7 представлено сравнение результатов определения удельной производительности при разной организации процесса, которое позволяет сделать вывод о том, что удельный съем сухого продукта повышается при создании более активной аэродинамической обстановки при взаимодействии потоков. Таким образом, при 2-х зонной сушке тепломассообменные процессы протекают интенсивней, что позволяет: увеличить удельный выход готовой продукции при модернизации действующих сушильных установок; повысить качество продукции за счет смягчения режима при сохранении производительности; сократить энергетические затраты на сушку; уменьшить размеры сушильной камеры при проектировании сушильной техники и др. Разработаны рекомендации по организации сушильного процесса.

В пятой главе представлена модель тепломассопереноса для расчета температур в течение процесса сушки в каждой пространственной точке объекта обезвоживания при реализации различных режимов при сушке.

Качественную сушку яичных продуктов следует выполнять, строго контролируя и регулируя все параметры процесса, включая температуру объектов обезвоживания. Определить поля температур в движущихся тонкодисперсных частицах при высокой интенсивности процесса промышленной распылительной сушки экспериментально невозможно, а значит, очевидна необходимость реализации математической модели тепломассопереноса. Реализация математической модели проводилась с учетом положений и допущений, аргументированных в работах И.Ю. Александяна 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.

Реализация математической модели тепломассопереноса выполнена в среде Mathcad Professional и позволила получить при рациональных и комбинированных режимах (таблица 5) поля распределения температур по диаметру частицы продукта (рисунок 9) и в зависимости от c .

Оценить адекватность модели можно ориентировочно по температуре поверхности частицы, которая измерялась в конце процесса сушки экспериментально в слое порошка продукта.

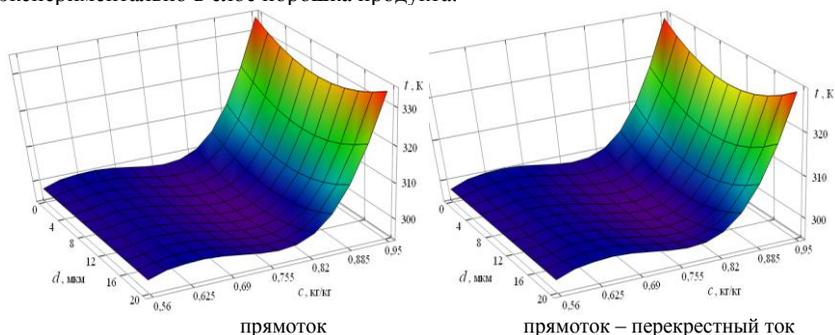


Рисунок 9 – Поле распределения температур по диаметру частицы яичного желтка в процессе распылительной сушки

Анализ полей распределения температур (рисунок 9) по диаметру частиц яичных продуктов и численные значения температур в пространственных точках частиц 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 материал практически не нагревается, а, следовательно, все тепло, сообщаемое материалу, полезно расходуется на испарение влаги. Далее наблюдается стремительный рост температуры материала по мере увеличения содержания сухих веществ до максимальных значений температур в конце процесса сушки. 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, что свидетельствует об углублении зоны испарения вглубь частицы и подтверждает ранее сделанные выводы о механизме влагопереноса и согласуется с классическими работами по сушке. Сравнение полей распределения температур при рациональных режимах для вариантов прямотока и комбинации прямотока – перекрестного тока (рисунок 9) 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, но и повысить качественные показатели. Средние по сечению материала значения температур яичных продуктов не превышали рекомендованных 333К, что обуславливает сохранность качества при сушке. Режимы могут быть рекомендованы для внедрения. На основе предложенной модели тепломассопереноса можно разработать программное обеспечение для программно-аппаратных комплексов распылительной сушки.

В шестой главе представлены рекомендации по практическому применению результатов научных и проектно-технических решений. Разработанный алгоритм получения комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки.

Предложенная сушилка (рисунок 10) относится к технике сушки пастообразных и жидких продуктов и может быть использована при производстве дисперсных материалов. Сушилка позволяет организовать равномерную, по высоте сушильной камеры, подачу сушильного агента и увеличить время пребывания распыленных частиц продукта в сушильной камере. Сушильный агент, проходя между перегородками 11, разделяется на несколько перекрещивающихся потоков, которые отталкивают частицы продукта от поверхности перегородок и, следовательно, от стенок сушильной камеры.

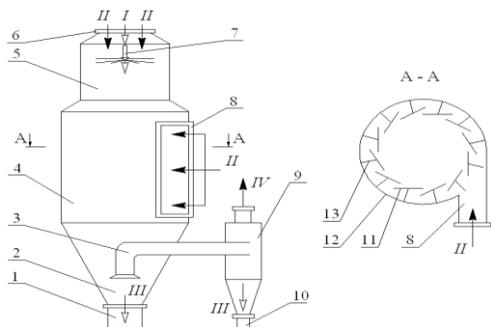


Рисунок 10 – Распылительная сушилка: 1 – узел выгрузки продукта; 2 – нижняя коническая часть камеры; 3 – система отсоса; 4 – цилиндрическая часть камеры; 5 – верхняя часть камеры; 6 – патрубок ввода сушильного агента; 7 – распылитель; 8 – патрубок ввода сушильного агента; 9 – циклон; 10 – сборник продукта; 11 – перегородки; 12 – сушильная камера; 13 – крепежный элемент

Спиралевидная траектория движения частиц определяет большее время контакта продукта с сушильным агентом по сравнению с традиционным прямолинейным движением вниз, что позволяет либо уменьшить высоту камеры при заданной производительности, либо увеличить удельную производительность установки. Сушилка рекомендована для трудносохнущих высоковязких термолabileльных материалов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

- Определены 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.

- 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 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 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 оборудования, а также для научного анализа кинетики и динамики тепломассообменных процессов, их моделирования и оптимизации.
- Изучен механизм внутреннего тепломассопереноса 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 и дополнительной перекрестной подачи сушильного агента в периоде падающей скорости сушки.
- 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.
- Разработан алгоритм получения комбинированных рациональных режимов 2-х зонной распылительной сушки. Реализация предложенных мероприятий позволяет при соответствующей модернизации сушильной техники увеличить производительность и термический коэффициент полезного действия.

- 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.
- Разработаны рекомендации по использованию результатов исследования.

Результаты и рекомендации, полученные в диссертационной работе на основе проведенных исследований, приняты к использованию и дальнейшему внедрению на предприятиях ООО «АСТРАХАНСКАЯ КОНСЕРВНАЯ КОМПАНИЯ», ГП АО «СХП Птицефабрика «Степная», ООО НПП «Золотое зернышко», ООО НПП «пЕДАНт», ООО «АСТРБИОПРОДУКТ» и др., где были отмечены высокий научно-технический уровень и актуальность исследований.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

W – влажность продукта, кг/кг; T, t, T_{prod} – температура продукта, К; ρ_b – плотность яичного белка, кг/м³; $\rho_{жс}$ – плотность яичного желтка, кг/м³; ρ_m – плотность яичного меланжа, кг/м³; c_b – удельная теплоемкость белка, Дж/(кг·К); $c_{жс}$ – удельная теплоемкость желтка, Дж/(кг·К); c_m – удельная теплоемкость меланжа, Дж/(кг·К); λ_b – теплопроводность белка, Вт/(м·К); $\lambda_{жс}$ – теплопроводность желтка, Вт/(м·К); λ_m – теплопроводность меланжа, Вт/(м·К); a – температуропроводность, м²/с; W_p – равновесная влажность, кг/кг; φ – относительная влажность воздуха, кг/кг; W_k – конечная влажность, кг/кг; W_n – начальная влажность, кг/кг; a, b, c, d, e, f, g, h – эмпирические коэффициенты; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); $\Delta\mu$ – разность химических потенциалов, Дж/моль; E – энергия связи влаги с материалом, Дж/моль; r – тепловая энергия испарения, Дж/кг; r^* – теплота парообразования свободной воды, Дж/кг; $r_{см.}$ – теплота смачивания, Дж/кг; δ_p – термоградиентный коэффициент, Дж/моль; $T_{с.а.}$ – температура сушильного агента, К; $dW/dt, dc/dt$ – скорость процесса сушки, кг/(кг·с); τ, τ_c – время сушки, с; a_k, b_k, c_k, d_k, e_k – эмпирические коэффициенты; $A_k, B_k, C_k, D_k, E_k, F_k, G_k, H_k, K_k, L_k, M_k, N_k$ – кинетические коэффициенты; Π, Π_k – удельная производительность, кг/(м³·ч); $a_{\Pi}, b_{\Pi}, c_{\Pi}, d_{\Pi}, e_{\Pi}, f_{\Pi}$ – эмпирические коэффициенты; x – координата глубины частицы, м; ε – коэффициент фазовых превращений.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в журналах рекомендованных ВАК РФ.

- 1. 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.
- 2. 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.
- 3. Губа, О.Е.** Исследование кинетики распылительной сушки меланжа с учетом влияния основных факторов на интенсивность тепломассообмена [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко // Журнал. Естественные и технические науки, №7(75). Москва: Издательство «Спутник+», 2014. С. 72 – 74.

Статьи и материалы конференций

- 4. 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 (54ППС): 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.
- 5. 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.
- 6. 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.
- 7. 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.
- 8. 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.
- 9. 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.
- 10. 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.

Подписано в печать « 22 » 04. 2015 г. Формат 60x84 1/16

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 149

ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет»

(ФГБОУ ВПО «АГТУ»)

Типография ФГБОУ ВПО «АГТУ»

Адрес типографии

г. Астрахань, ул. Татищева, 16 ж.