

На правах рукописи

Брюханов Максим Андреевич



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ПОЛУТВЕРДЫХ
СЫРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ**

05.18.04 – технология мясных, молочных и рыбных
продуктов и холодильных производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО «КузГСХА»).

Научный руководитель: **Ермолаев Владимир Александрович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Расщепкин Александр Николаевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», профессор кафедры
теплохладотехники

Сухих Станислав Алексеевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», зав. лабораторией микробиологии и биотехнологий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Алтайский научный центр агробiotехнологий» (ФГБНУ ФАНЦА)

Защита диссертации состоится «02» июня 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 307.007.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет» по адресу 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, ауд. 255.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»

<https://www.klgtu.ru/science/diss/soviets/dissertatsii/>

E-mail: olga.anohina@klgtu.ru

Факс: 8(4012)99-53-46

Автореферат разослан «____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В России в настоящее время многие промышленные предприятия нуждаются в качественных преобразованиях за счет внедрения инновационных технологий, которые бы обеспечивали экономический рост и интенсификацию производства. При этом одной из актуальных задач многих отраслей промышленности, в том числе пищевой, было и остается вопрос об обеспечении сохранности биологически ценного сырья. Для решения данного вопроса существует ряд технологий, из которых наибольшие перспективы показывает сушка. Обезвоживание является эффективным методом пролонгации сроков годности пищевого сырья, при этом значительно сокращаются затраты на хранение и транспортировку сухих продуктов. На данный момент существует большое множество способов обезвоживания, одной из которых является вакуумная сушка.

Выше указанный способ обезвоживания обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами сушки – возможность осуществления процесса при невысоких температурах, относительно небольшая продолжительность сушки и др. Эффективность вакуумной сушки зависит от многих параметров, которые должны подбираться на основе экспериментальных исследований. Наибольшее влияние оказывает кинетика нагрева, которая в свою очередь зависит от способа подвода теплоты, мощности источника излучения и длины волны непосредственно самого излучения.

Ввиду вышесказанного становится актуальным вопрос об исследовании влияния способа подвода теплоты, в том числе длины волны излучения, на процесс вакуумной сушки продуктов.

В диссертационной работе в качестве объекта исследования были выбраны полутвердые сыры как источники биологически ценных веществ: белков, витаминов, минеральных веществ, незаменимых аминокислот, полиненасыщенных жирных кислот, фосфолипидов и др.

Сухие сыры могут использоваться для снабжения питанием геологов, туристов, военных, моряков, работников лесной, газовой, строительной, нефтеперерабатывающей промышленности и т.д. Они являются ценным продуктом с точки зрения высоких сроков хранения и энергетической ценности. Кроме того, сухие сыры могут применяться для обогащения других пищевых продуктов: мясных, рыбных, хлебобулочных изделий и т.д. При этом сухие сыры позволяют улучшить их пищевой состав и снизить стоимость.

Вакуумная сушка сыров позволяет снизить температуру нагрева и устранить температурную денатурацию термолабильных компонентов данного продукта, что повышает его качество.

Степень проработки темы исследований.

Исследованиями в области сушки пищевых продуктов занимались такие ученые как Н.Н. Липатов, В.Д. Харитонов, П.А. Ребиндер, П.Д. Лебедев, М.В. Лыков, В.М. Позняковский, А.Н. Петров, R.A. Venketeshwer, T. Swasdisevi, A. Peamsuk Suvarnakuta и др. При этом влияние длины волны на процесс вакуум-

ной сушки изучено довольно слабо. В работах А.С. Гинзбурга затрагивается данная тема, однако дальнейшего широкого развития она не получила.

Цель и задачи исследований.

Целью диссертационной работы являлось исследование влияния способа подвода теплоты при вакуумной сушке полутвердых сыров на качественные показатели сухих сыров и эффективность обезвоживания. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- провести анализ форм связи влаги в полутвердых сырах;
- подобрать эффективные технологические режимы вакуумной сушки полутвердых сыров;
- провести анализ качественных показателей сухих полутвердых сыров и эффективности сушки в зависимости от способа подвода теплоты;
- исследовать микроструктуру полутвердых сыров до и после обезвоживания;
- исследовать сорбционные свойства сухих полутвердых сыров в процессе хранения;
- разработать технологию вакуумной сушки полутвердых сыров;
- провести анализ экономической эффективности разработанной технологии вакуумной сушки полутвердых сыров.

Научная новизна работы:

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- научно обоснованы эффективные технологические режимы вакуумной сушки полутвердых сыров;
- экспериментальным путем исследовано влияние длины волны излучения на процесс вакуумной сушки полутвердых сыров;
- проанализирована кинетика вакуумной сушки полутвердых сыров в нестационарном поле излучения;
- исследована микроструктура полутвердых сыров до и после сушки.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Экспериментальным путем установлены эффективные режимы вакуумной сушки полутвердых сыров. Разработана технология трехстадийной вакуумной сушки полутвердых сыров в нестационарном поле излучения.

Исследованы качественные показатели сухих полутвердых сыров, проанализирован процесс адсорбции влаги сухих сыров в процессе их хранения.

Доказана экономическая эффективность разработанного способа вакуумной сушки полутвердых сыров. Установлено, что при использовании ступенчатого метода ИК-сушки удастся снизить величину энергозатрат на 10÷12% по сравнению с традиционным методом.

Материалы исследований внедрены в учебный процесс при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий, а также в дипломном проектировании студентов, обучающихся на кафедре «Биотехнологий и производства продуктов питания» ФГБОУ ВО Кузбасская ГСХА.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационного исследования использовались как стандартные, общепринятые, так и ори-

гинальные методики определения физико-химических, органолептических, теплофизических и других характеристик объекта исследований.

Положения, выносимые на защиту.

- технологические режимы вакуумной сушки полутвердых сыров;
- влияние способа подвода теплоты на эффективность процесса вакуумной сушки полутвердых сыров;
- качественные показатели сухих полутвердых сыров.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Область исследований диссертации соответствует п.п. 1, 2, 9 и 10 паспорта научной специальности 05.18.04 – Технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств.

Степень достоверности и апробация работы. Основные результаты работы были изложены на всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе на международной научной конференции «Пищевые инновации и биотехнологии» (г. Кемерово, 2015 г.), Новая наука: От идеи к результату (г. Уфа, 2016 г.), Кузбасс: образование, наука, инновации (г. Новокузнецк, 2016 г.), News of Science and Education (Прага, 2017 г.) и др.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, получено 2 патента.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает в себя следующие разделы: введение, литературный обзор, постановка экспериментальных исследований, результаты исследований и их обсуждение, выводы, список использованных источников и приложения. Основное содержание работы изложено на 147 страницах машинописного текста, содержит 25 таблиц и 55 рисунков. Список литературы включает 151 наименование.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Диссертационная работа выполнена в ФГБОУ ВО Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия на кафедре «Биотехнологий и производства продуктов питания». Весь цикл экспериментальных исследований состоял из нескольких последовательных взаимосвязанных этапов, общая схема которых изображена на рис. 1.

На первом этапе проводили анализ форм связи влаги в полутвердых сырах. С помощью термогравиметрии получали графики, по которым исследовали кинетику дегидратации образцов сыра. Определяли периоды дегидратации воды и деструкции сухих веществ при термической обработке полутвердых сыров, а также температурные интервалы, на которых происходит высвобождение влаги с различной формой связи.

На втором этапе подбирали эффективные режимы вакуумной сушки полутвердых сыров, такие как температура процесса, остаточное давление, плотность теплового потока и толщина слоя сушки. Исследовали влияние вышеука-

занных параметров на продолжительность обезвоживания, удельные энергозатраты и качественные показатели сухих сыров.



Рисунок 1 – Схема проведения экспериментальных исследований

На третьем этапе проводили анализ влияния способа подвода теплоты на процесс вакуумной сушки продукта. Проводили подбор длины волны инфракрасного излучения, пространственного расположения ИК-ламп, а также осуществляли сушку в нестационарном поле излучения.

На четвертом этапе исследовали качественные характеристики сухих полутвердых сыров. Определяли величину усадки в процессе вакуумной сушки, исследовали содержание витаминов, органических и жирных кислот, фракционный состав белков, аминокислотный состав. С помощью электронного микроскопа исследовали микроструктуру сыров до и после сушки. Устанавливали величину сорбции влаги сухими сырами.

На пятом этапе разрабатывали технологическую схему вакуумной сушки полутвердых сыров в нестационарном поле излучения с использованием подобранных технологических режимов.

На заключительном этапе проводили расчет экономической эффективности применения разработанного ступенчатого способа вакуумной сушки по сравнению с традиционным методом.

Формы связи влаги в продукте определяли методом неизотермического анализа на дериватографе. Содержание влаги в сырах определяли с помощью ускоренного метода на приборе Чижовой. Содержание жира в сырах определяли кислотным методом Гербера по ГОСТ 5867-90. Содержание органических кислот в сырах после сушки определяли по ГОСТ Р 51471-99 «Жир молочный. Метод обнаружения растительных жиров газожидкостной хроматографией». Содержание жирных кислот в сухих сырах определяли по ГОСТ Р 51486-99 «Масла растительные и жира животные. Получение метиловых эфиров жирных кислот» и ГОСТ Р 52253-2004 «Масло и паста масляная из коровьего молока. Общие технические условия». Исследование витаминного состава осуществляли методом капиллярного зонного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель 105». Молекулярно-массовое распределение белков в сухих сырах анализировали с помощью белкового электрофореза методом Лэмли. Микроструктурные исследования осуществляли на растровом сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6390 LA. Анализ аминокислотного состава осуществляли с помощью ионообменной хроматографии на аминокислотном анализаторе ARACUS.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ПОЛУТВЕРДЫХ СЫРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ

Формы связи влаги в сырах

Опыты по исследованию форм связи влаги в полутвердых сырах проводились с использованием неизотермического анализа на дериватографе.

На рис. 2 приведены графики, полученные методом термогравиметрии, для сыра «Голландский».

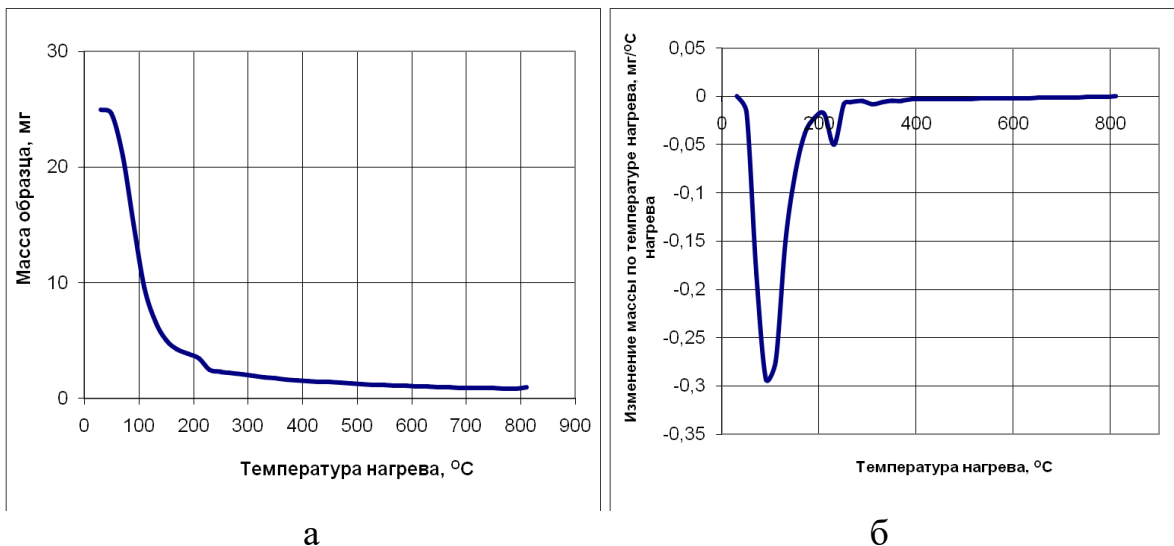


Рисунок 2 – Графики изменения массы (а) и скорости изменения массы (б) образца сыра «Голландский» от температуры нагрева

При нагреве образцов полутвердых сыров наблюдалось постоянное снижение массы, которое начиналось при температуре порядка 50° С и завершилось при температуре 700-800° С. На графиках скорости изменения массы наблюдаются два характерных пика: для сыра «Голландский» – на температурном интервале 63-172° С и на температурном интервале 178-246° С. Данные пики соответствуют двум процессам, сопровождающихся потерей массы: первый пик характеризует степень дегидратации, второй – степень деструкции веществ.

Далее участок на графике изменения массы образца, соответствующий степени дегидратации в интервальной температуре первого пика преобразовывался в зависимость степени превращения вещества от температуры нагрева.

Степень превращения вещества определялась по следующей формуле:

$$a = \frac{\Delta m_i}{\Delta m_{\max}}, \quad (1)$$

где Δm_i – изменение массы образца к данному моменту; Δm_{\max} – изменение массы образца за весь период.

Далее строили зависимость величины $(-lga)$ от значений $1000/T$, представленная на рис. 3 для сыра «Голландский». На данном графике выделяются три участка, на которых происходит удаление влаги с различной формой связи.

В процессе нагревания сыра «Голландский» со скоростью подъема температуры 10 К/мин до температуры 365 К (92° С) наблюдается удаление влаги с физико-химической связью и осмотически-связанной влаги. В процессе дальнейшего нагревания сыра «Голландский» до температуры 394 К (121° С) происходит удаление адсорбционно-связанной влаги. Свыше указанной температуры в сыре «Голландский» происходит завершение сильно связанной адсорбционной влаги, участвующей в гидратации активных групп сухих веществ. При температуре 121° С в исследуемом продукте наблюдается наибольшая скорость удаления влаги.

В табл. 1 приведены результаты анализа кинетики дегидратации всех исследуемых полутвердых сыров.

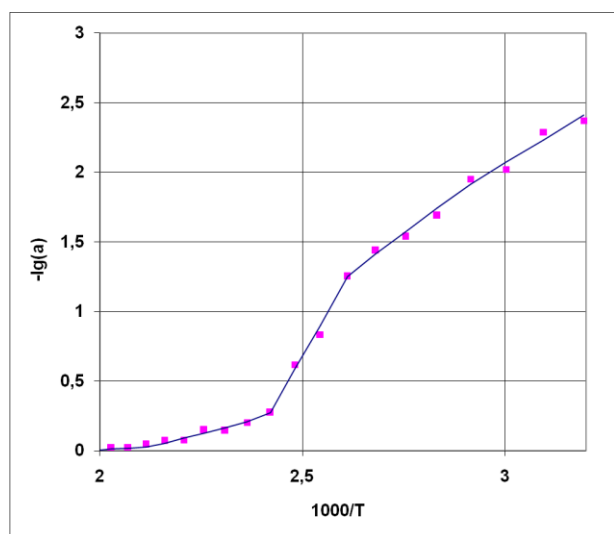


Рисунок 3 - Зависимость величины $-\lg(a)$ от значений $1000/T$ при нагревании сыра «Голландский»

Представленные данные свидетельствуют о том, что наибольшая часть влаги в исследуемых сырах: от 60,3 % («Пошехонский») до 69,7 % («Костромской») приходится на свободную влагу. Для сыра «Голландский» извлечение основной массы влаги наблюдается на температурной участке $73-172^{\circ}\text{C}$. Для сыров «Костромской» и «Пошехонский» температурные диапазоны лежат в пределах $78-196^{\circ}\text{C}$ и $94-242^{\circ}\text{C}$ соответственно. Температура, при которой начинается процесс деструкции веществ составляет $178, 192$ и 211°C соответственно для сыров «Голландский», «Костромской» и «Пошехонский».

Таблица 1 – Кинетика дегидратации полутвердых сыров

Номер ступени дегидратации	$\Delta T, ^{\circ}\text{C}$	Степень превращения вещества (a)	Массовая доля удаляемой влаги, %
Сыр Голландский			
1	63-108	0-0,626	62,6
2	108-142	0,626-0,821	19,5
3	142-172	0,821-1,0	17,9
Сыр Костромской			
1	65-112	0-0,697	69,7
2	112-156	0,697-0,870	17,3
3	156-186	0,870-1,0	13,0
Сыр Пошехонский			
1	68-115	0-0,603	60,3
2	115-152	0,603-0,852	24,9
3	152-187	0,852-1,0	14,8

Определение технологических режимов вакуумной сушки полутвердых сыров

Вначале исследовали процесс вакуумной сушки полутвёрдых сыров при различной температуре нагрева. На рис. 4 изображены графики, полученные в ходе обезвоживания сыра «Костромской», такие как изменение относительной массы, скорость изменения относительной массы и температура в продукте.

Наибольшая скорость обезвоживания наблюдалась через 40-55 мин после начала процесса сушки и составляла порядка 12-16 %/час (в зависимости от вида сыра и температуры нагрева). При установленной температуре нагрева в 40° С температура в продукте достигала необходимого значения через 30-40 мин. после начала процесса сушки. Увеличение температуры нагрева до 60, 60 и 70° С влечет за собой повышение продолжительности сушки соответственно до 40-50, 55-65 и 70-90 мин.

Общая продолжительность вакуумного обезвоживания сыров «Голландский», «Костромской» и «Пошехонский» при температуре нагрева 40° С составляет 335±15, 310±15 и 285±15 мин. соответственно. Повышение температуры сушки до 50° С дает возможность сократить продолжительность процесса в среднем на 25-35 мин. Наименьшее время сушки наблюдалось при температуре нагрева 70° С и составило 235±15, 225±15 и 195±15 мин. соответственно для сыров «Голландский», «Костромской» и «Пошехонский».

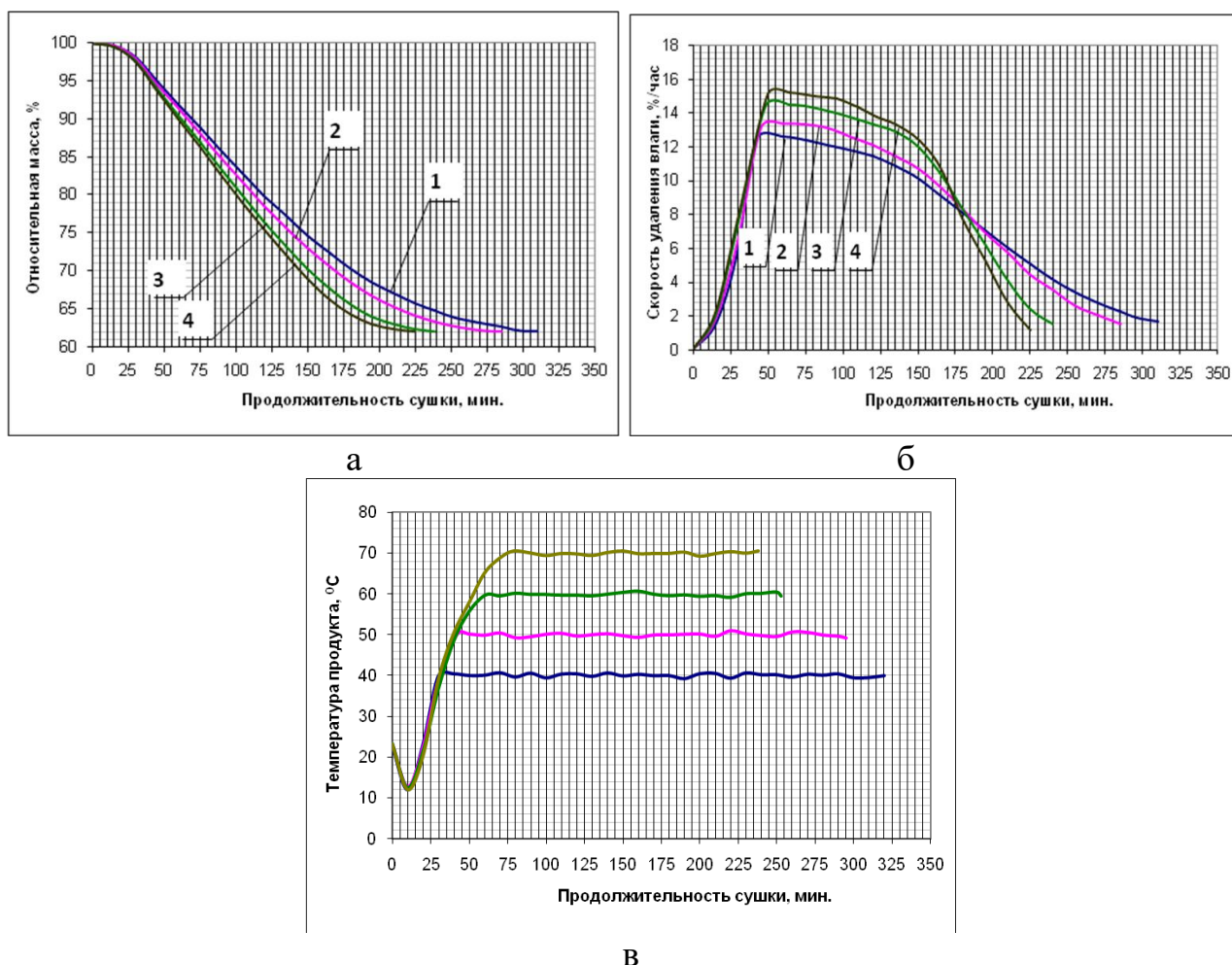


Рисунок 4 – Графики зависимости относительной массы (а), скорости изменения относительной массы (б) и температуры в продукте (в) от продолжительности вакуумной сушки сыра «Костромской» при температуре нагрева:
1 - 40° С; 2 - 50° С; 3 - 60° С; 4 – 70° С

Проводился анализ содержания влаги и жира в сухом веществе при вакуумной сушке полутвердых сыров с различными температурными режимами. На рис. 5 представлены соответствующие графики.

Установлено, что с повышением температуры сушки от 40 до 70° С влагосодержание конечного продукта снижается от 5,4-5,7% до 4,7-4,9%, что обусловлено интенсификацией процесса удаления влаги. Увеличение температуры нагрева влечет за собой более интенсивное вытапливание жиров, вследствие чего в обезвоженном продукте содержание жира в сухом веществе снижается. При исходном содержании жира в сухом веществе у сыров «Голландский», «Костромской» и «Пошехонский» соответственно 45,1; 46,2 и 46,7% потери данного компонента составляют порядка 1-4,5, 0,5-2 и 0,5-3% соответственно в зависимости от температуры сушки.

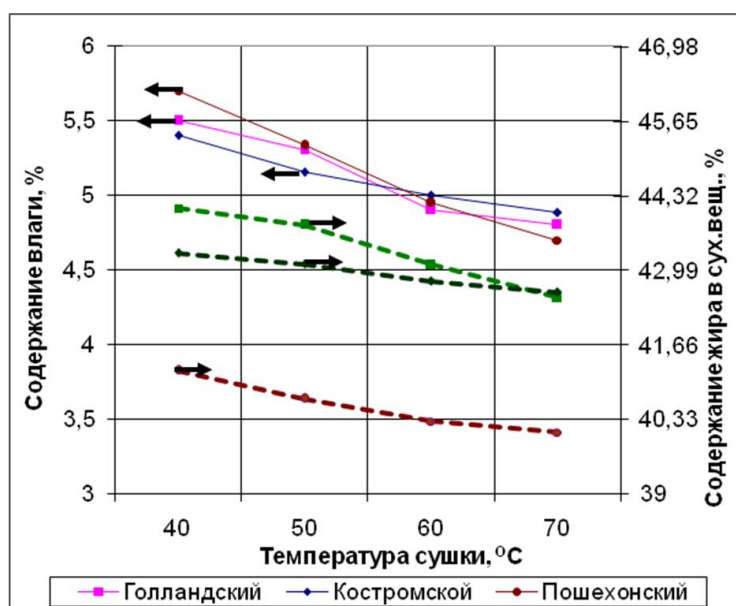


Рисунок 5 – Содержание жира в сухом веществе и влаги в полутвердых сырах после вакуумной сушки при подборе температуры

Результаты анализа органолептических показателей сухих сыров представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Органолептическая оценка сухих полутвердых сыров при подборе температуры вакуумной сушки, баллы

Наименование сыра	Температура сушки, °С			
	40	50	60	70
Голландский	36	34	32	29
Костромской	37	36	32	28
Пошехонский	37	36	33	27

Таким образом, наибольшей органолептической оценкой (36-37 баллов из 40) характеризовались сыры, обезвоженные при температуре 40 °С. Повышение температуры нагрева негативно сказывается на качественных показателях готового продукта. Среднеарифметическая органолептическая оценка сухих по-

лутвердых сыров, высушенных при температуре 50, 60 и 70° С, составила соответственно 35,3; 32,3 и 28 баллов из 40. На основании вышеизложенных результатов исследований рекомендована температура вакуумной сушки полутвердых сыров в 50° С.

Аналогичным образом проводились исследования по подбору остальных параметров сушки полутвердых сыров: остаточного давления, плотности теплового потока и толщины слоя сушки. По результатам анализа были подобраны наиболее эффективные режимы обезвоживания, обеспечивающие высокое качество продукта при относительно небольшой продолжительности процесса: остаточное давление - 3-4 кПа, плотности теплового потока - 6 кВт/м², толщина слоя сушки - 10 мм.

Способ подвода теплоты

Вначале исследовали влияние длины волны излучения на процесс вакуумной сушки полутвердых сыров. Полутвердые сыры обезвоживали при подобранных ранее технологических режимах: температура сушки - 50° С, остаточное давление - 3-4 кПа, плотность теплового потока – 6 кВт/м², толщина слоя – 10 мм. При этом длину волны меняли в пределах от 0,8 до 3 мкм путем подбора различных излучателей и величины накала.

Установлено, что при повышении длины волны излучения увеличивается разность температур между внутренней частью и наружными слоями продукта, поскольку с увеличением длины волны меняются пропускательная и поглощательная способности вещества. При обезвоживании с большим значением длины волны сыр прогревается по большей части на поверхности. Благодаря этому поверхность быстро высыхает и образуется обезвоженная корочка, которая препятствует перемещению влаги из центра на поверхность продукта. Таким образом, скорость сушки снижается и значение глубины, которая соответствует наибольшей температуре продукта, меняется.

При повышении длины волны излучения от 0,8 до 1,0 мкм происходит некоторое уменьшение продолжительности обезвоживания. Это может быть вызвано более быстрым прогревом продукта. Однако с дальнейшим повышением длины волны продолжительность сушки увеличивается.

Таблица 3 - Продолжительность обезвоживания полутвердых сыров при подборе длине волны излучения, мин.

Марка сыра	Длина волны, мкм				
	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0
Голландский	265	255	270	290	315
Костромской	255	245	260	275	310
Пошехонский	230	225	245	260	290

Исследование влияния длины волны инфракрасного излучения на качество полутвердых сыров и эффективность сушки

Далее проводили анализ вакуумной сушки в нестационарном поле излучения. Для этого использовали три группы ламп, установленные в камере. На

первом этапе включается первая группа ламп с длиной волны 3 мкм, на втором этапе – соответственно задействуется вторая группа ламп с длиной волны 1,5 мкм (первые лампы при этом выключаются), на третьем этапе длина волны составляет 0,8 мкм.

В табл. 4 приведены параметры режимов, используемых в серии экспериментов. Были выбраны 3 режима с различной продолжительностью этапов.

Таблица 4 – Параметры режимов трехстадийной вакуумной сушки полутвердых сыров

Номер режима	Длительность этапов, мин.		
	1 этап	2 этап	3 этап
1	40	20	до завершения
2	50	15	до завершения
3	60	10	до завершения

На рис. 6 приведены графики вакуумной сушки сыра «Костромской» при использовании данных режимов.

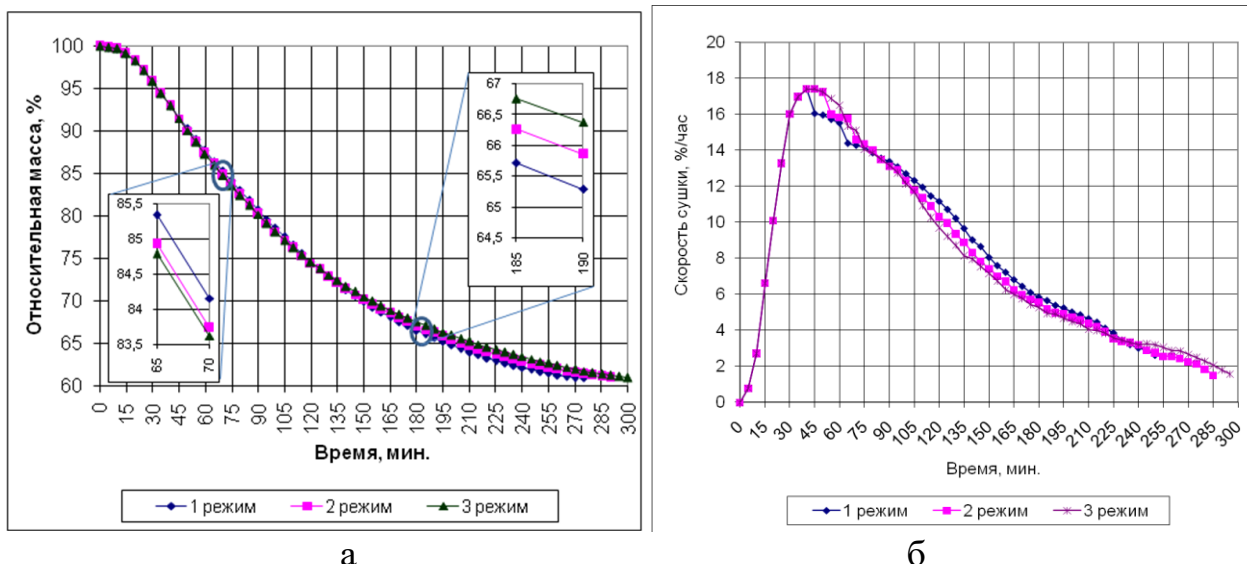


Рисунок 6 – Графики зависимости относительной массы (а) и скорости изменения относительной массы (б) в процессе ступенчатой вакуумной сушки сыра «Костромской»

Установлено, что при переходе на последующую ступень сушки скорость обезвоживания несколько снижается, что вызвано снижением поглощательной способности периферийных слоев сыра.

Из всех исследованных режимов первый обеспечивал наибольшую эффективность сушки. При нем вначале сушки происходило интенсивное испарение влаги с поверхности продукта, которая нагревалась больше всего благодаря использованию ИК-ламп с большой длиной волны.

Когда большая часть влаги с периферийных слоев была удалена, но при этом еще не образовалась сухая корочка, происходил переход на следующую ступень сушки, когда включались сушильные лампы со средней длиной волны

и происходил прогрев срединных слоев сыра. Установлено, что через 150 мин. после начала процесса сушки скорость обезвоживания при первом, втором и третьем режимах составляла соответственно 9,7; 7,9 и 7,1 %/час.

Последний этап сушки характеризовался использованием сушильных ламп с короткой волной излучения. Это обеспечивало прогрев всего объема продукта. Таким образом, рассмотренный способ многоступенчатой сушки обеспечивает последовательный прогрев продукта от периферии к центру и удаление влаги из всего объема.

Продолжительность вакуумного обезвоживания сыра «Костромской» при использовании первого, второго и третьего режимов составила 230, 270 и 300 мин. соответственно.

Наблюдается незначительное ухудшение органолептических характеристик при использовании второго и третьего режимов по сравнению с первым режимом. При этом суммарный балл органолептической оценки при использовании первого режима не ниже, чем при стационарной сушке. Таким образом, исходя из результатов исследований рекомендуется обезвоживать сыры методом указанной трехступенчатой вакуумной сушки с продолжительностью первого этапа 40 мин., второго этапа - 20 мин.

Следующим этапом исследований было изучение влияния расстояния от источника излучения до поддона с продуктом на эффективность процесса сушки. Для анализа влияния данного фактора были проведены опыты по вакуумной сушке с подобранными ранее режимами и расстоянием между излучателем и продуктом от 10 до 30 см. Поскольку в ранее проведенных опытах был выбран трехступенчатый режим сушки, предусматривающий использование трех групп ламп, то с целью обеспечения равномерного распределения излучения лампы располагались по схеме, представленной на рис. 7.

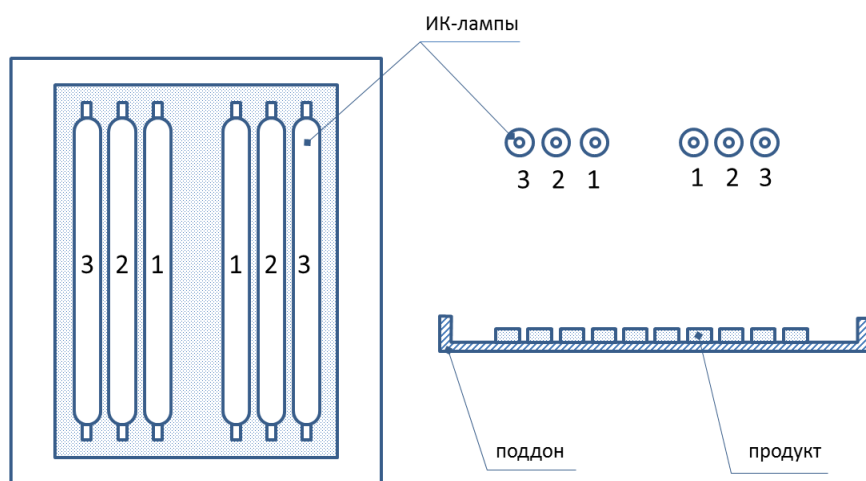


Рисунок 7 – Схема расположения ИК-излучателей

Расстояние между ИК-лампой и лотком с продуктом в различных опытах составляло 10, 15, 20, 25 и 30 см.

Представленные данные свидетельствуют о том, что наилучшее качество сыра наблюдается при наибольшем расстоянии от ИК-ламп до поддона с про-

дуктом – в данном случае 30 см. Как и ожидалось, при уменьшении расстояния между ИК-лампами и поддоном с продуктом повышается неравномерность качества продукта по всей площади лотка. Это вызвано неравномерностью распределения плотности излучения по площади поддона из-за чего одна часть лотка с продуктом перегревается, а другая недостаточно нагревается, что подтверждается данными по содержанию влаги.

Обнаружено, что наихудшее качество продукта наблюдается у тех кусочков, которые были расположены непосредственно возле третьей группы ламп, осуществляющих сушку большую часть времени - на расстоянии 120÷140 мм от центра поддона. Это особенно проявляется при расстоянии между ИК-лампами и поддоном с продуктом в 100 мм: кусочки продукта на расстоянии 120 мм от центра поддона обладали наименьшими органолептическими показателями – общий балл составил 33,2 из 40.

Установлено, что при увеличении расстояния между поддоном с продуктом и сушильной лампой от 100 до 200 мм удельные энергозатраты повышаются на 23-28%, что связано с большей степенью рассеивания ИК-излучения на внутреннюю поверхность сушильной камеры. При дальнейшем увеличении указанного расстояния от 200 до 300 мм энергозатраты возрастают еще на 8-10%. Таким образом, из соображений по оптимальному сочетанию цены/качества продукта было рекомендовано обезвоживание при расстоянии между ИК-лампой и продуктом в 20 см.

Качественные характеристики сыров вакуумной сушки

Усадочные явления

В большинстве случаев при удалении влаги из продукта наблюдается его усадка. На рис. 8 приведена зависимость длины образцов полутвердых сыров от содержания влаги.

Были получены следующие линейные уравнения, позволяющие определить линейную усадку сыров от содержания влаги:

$$\text{- для сыра «Голландский»}: \delta = -0,504U + 21,9 ; \quad (2)$$

$$\text{- для сыра «Костромской»}: \delta = -0,533U + 23,43 ; \quad (3)$$

$$\text{- для сыра «Пошехонский»}: \delta = -0,47U + 19,55 , \quad (4)$$

где δ – коэффициент усадки, %; U – содержание влаги, %.

Как и ожидалось, у сыров с большим первоначальным влагосодержанием коэффициент усадки выше: для сыров «Голландский», «Пошехонский» и «Костромской» при влагосодержании 5% величина усадки составила соответственно 19,5; 17,1 и 20,7%.

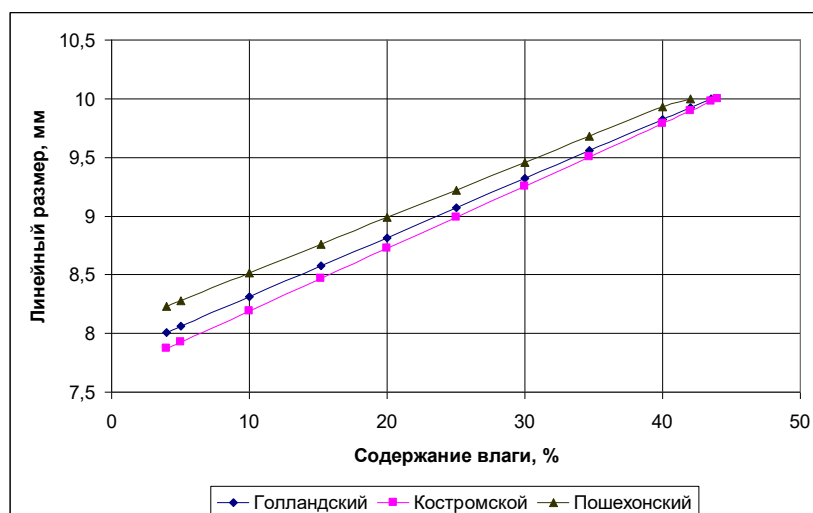


Рисунок 8 – Графики зависимости длины образцов полутвердых сыров в процессе вакуумной сушки

Исследование сорбционных свойств

Для получения изотерм сорбции полутвердые сыры выдерживали в эксикаторах с серной кислотой различной концентрации для обеспечения относительной влажности воздуха от 10 до 100%. Образцы сыров взвешивали через каждые сутки до стабилизации веса. Изотермы сорбции сыра «Голландский» приведены на рис. 9.

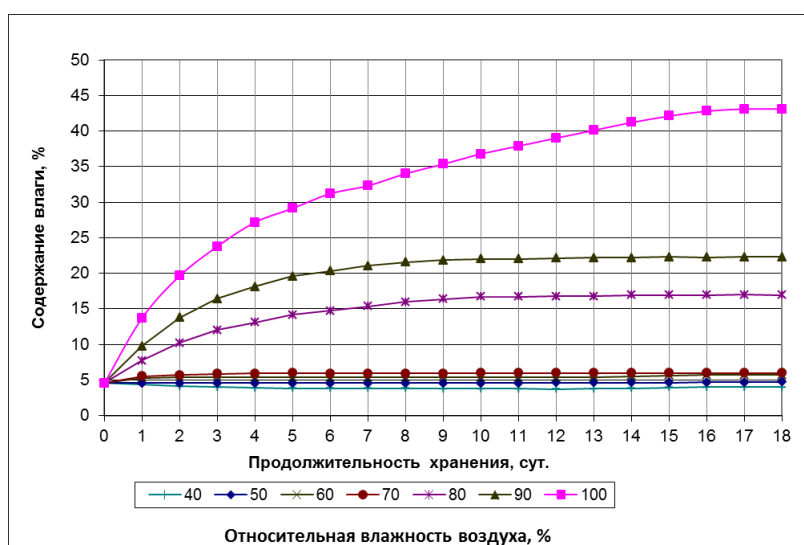


Рисунок 9 – Изотермы сорбции сухого сыра «Голландский» при различной относительной влажности воздуха

Обнаружено, что при относительной влажности воздуха 40-70% состояние равновесной влажности наступает спустя 2-6 суток хранения. В случае, когда сыры выдерживали при относительной влажности воздуха 40-70%, при достижении равновесной влажности содержание влаги в сырах составляло от 4 до 7%. Повышение относительной влажности воздуха до 80% влечет за собой значительную интенсификацию сорбции влаги. При указанных условиях равновесная влажность наступает через 10-14 суток хранения, а содержание влаги

сыров «Пошехонский», «Костромской» и «Голландский» через данное время хранения составляет 14,8%, 13,2% и 16,9% соответственно. При дальнейшем повышении относительной влажности воздуха до 90% равновесное влагосодержание полутвердых сыров увеличивается еще на 5-7%. При относительной влажности воздуха 100% происходила наиболее интенсивная сорбция влаги сырами. При указанных условиях равновесная влажность наступает спустя 16-18 суток хранения, а содержание влаги через данный промежуток времени составляло 39,0; 38,9 и 43,1% соответственно для сыров «Пошехонский», «Костромской» и «Голландский».

Таким образом, было обнаружено, что на сорбцию влаги влияет не только относительная влажность воздуха, но и индивидуальные свойства самих продуктов. Исследуемые сыры характеризуются достаточно высокой гигроскопичностью, которая может быть численно выражена через коэффициент сорбции K_c (г/гс.в.):

$$K_c = \frac{W_c}{C_c}, \quad (5)$$

где W_c – массовая доля влаги в продукте после сорбции, %;

C_c – содержание сухих веществ в продукте после сорбции, %.

Результаты расчета коэффициентов сорбции сухих сыров при температуре хранения 20 °С приведены в табл. 5.

Таблица 5 - Коэффициенты сорбции сухих сыров

Вид сыра	Относительная влажность воздуха, %						
	40	50	60	70	80	90	100
Голландский	0,04	0,05	0,06	0,06	0,20	0,29	0,76
Костромской	0,05	0,06	0,07	0,07	0,16	0,25	0,64
Пошехонский	0,05	0,05	0,06	0,06	0,17	0,27	0,64

При относительной влажности воздуха от 40 до 70% коэффициенты сорбции сыров лежат в пределах 0,04÷0,07. При увеличении относительной влажности воздуха до 100% наблюдается повышение коэффициентов сорбции сыров до 0,64÷0,76. При этом наибольшие значения коэффициентов сорбции наблюдались в сыре «Голландский».

Состав органических кислот

Количественное содержание органических кислот в полутвердых сырах до и после обезвоживания приведено в табл. 6.

В сырах до сушки наибольшим содержанием характеризовалась молочная кислота – ее массовая доля составила 18905,59÷23702,41 мг/кг. Наименьшей концентрацией характеризовалась муравьиная кислота. После сушки у сыров «Пошехонский» и «Костромской» концентрация молочной кислоты несколько повысилась, что может быть обусловлено процессами созревания. При этом содержание уксусной кислоты уменьшилось на 30, 41 и 23% для сыров «Поше-

хонский», «Костромской» и «Голландский» соответственно. В сухих сырах не было обнаружено муравьиной кислоты.

Таблица 6 – Массовая доля органических кислот в полутвердых сырах, мг/кг

Наименование кислоты	Голландский	Костромской	Пошехонский
До сушки			
Молочная	19045,24	23702,41	18905,59
Уксусная	670,41	554,18	755,92
Муравьиная	99,12	112,42	65,43
После сушки			
Молочная	19736,01	26830,20	23005,08
Уксусная	512,84	325,65	527,39
Муравьиная	-	-	-

Витаминный состав

Концентрация витаминов в полутвердых сырах до и после обезвоживания приведена в табл. 7.

Таблица 7 – Концентрация витаминов в полутвердых сырах, мг/100 г продукта

Наименование витамина	Голландский	Костромской	Пошехонский
До сушки			
В ₁ (тиаминхлорид)	0,04	0,03	0,06
В ₂ (рибофлавин)	0,32	0,21	0,20
В ₆ (пиридоксин)	0,004	0,005	0,002
С (аскорбиновая кислота)	1,291	2,009	1,748
В _с (фолиевая кислота)	0,202	0,256	0,309
После сушки			
В ₁ (тиаминхлорид)	0,07	0,06	0,08
В ₂ (рибофлавин)	0,53	0,30	0,34
В ₆ (пиридоксин)	0,006	0,01	0,003
С (аскорбиновая кислота)	2,041	3,332	2,959
В _с (фолиевая кислота)	0,29	0,408	0,497

Сушка способствует увеличению концентрации витаминов в сырах. Ввиду относительно невысокой температуры сушки отмечается достаточно высокая степень сохранности водорастворимых витаминов. После сушки содержание рибофлавина и фолиевой кислоты повышается в среднем в 1,5 раза, а содержание пиридоксина и аскорбиновой кислоты – в 1,5-1,6 раз. Из всех исследованных витаминов наибольшим содержанием характеризовалась аскорбиновая кислота – 1,291-2,009 мг/100 г до сушки и 2,041-3,332 мг/100 г после сушки.

Состав жирных кислот

В исследованных сырах по содержанию выделялись такие кислоты как пальмитиновая (25,3-29,1%) и олеиновая (30,6-32,5%). Также относительно высоким содержанием характеризовались стеариновая (13,7-15,5%) и миристиновая (10,0-11,7%) кислоты. Из незаменимых кислот стоит также отметить линоленовую и линолевою. Линоленовая кислота способна образовывать другие полиненасыщенные жирные кислоты. После удаления влаги состав жирных кислот по процентному соотношению практически не поменялся, что свидетельствует об отсутствии изменений нативных вкусо-ароматических свойств.

Аминокислотный состав

В нативных сырах по содержанию наиболее выделялись следующие аминокислоты: глутаминовая кислота, лизин и аргинин: их концентрация составила 12-14, 7-11 и 8-10% от общего содержания аминокислот. Стоит также отметить, что лизин и аргинин являются незаменимыми аминокислотами, поступающими с пищей.

После вакуумного обезвоживания содержание аминокислот несколько увеличилось из-за повышения концентрации сухих веществ. Содержание изолейцина увеличилось в среднем 1,7 раза, цистеина – в 1,4 раза, аспарагиновой кислоты – в 1,3 раза. Степень повышения содержания аминокислот меньше, чем степень увеличения концентрации сухих веществ из-за тепловой денатурации белков

Разработка технологии вакуумной сушки полутвердых сыров

На основании проведенных исследований была разработана технология вакуумной сушки полутвердых сыров.

Исходное сырье (сыр) хранится в холодильных ларях при температуре (4 ± 2) °С.

Перед измельчением сыр освобождают от упаковки, штафа и парафинового слоя. Далее сыр измельчают до толщины слоя 10 мм. Форма может быть произвольной – пластины, кубики, прямоугольники. Измельчение сыра производят непосредственно в сушильный поддон.

Далее поддоны с измельченным сыром загружают в сушильную камеру и следует этап вакуумной сушки при следующих технологических параметрах:

- температура нагрева - 50° С;
- остаточное давление - 3-4 кПа;
- плотность теплового потока - 6 кВт/м².

Температуру поверхности конденсатора рекомендуется устанавливать в диапазоне минус 20–30 °С. При такой температуре обеспечивается эффективный отвод влаги из удаляемого воздуха.

Сушка производится в три этапа с последовательным изменением длины волны от 3 до 0,8 мкм. На первом этапе, длительностью 40 мин. сушка осуществляется группой ламп с длиной волны 3 мкм, на втором этапе, длительностью 20 мин. сушка производится второй группой ламп с длиной волны 1,5 мкм

(первые лампы при этом выключаются), на третьем этапе длина волны составляет 0,8 мкм. Расстояние между ИК-лампами и продуктом составляет 20 см.

После сушки инфракрасные лампы выключают, вакуум сбрасывают и обезвоженный сыр охлаждается путем естественной конвекции до температуры (20 ± 3) °С. Длительность охлаждения составляет около 40 мин.

Далее сыр направляется на расфасовку и упаковку, которая осуществляется вакуумным способом в комбинированные пакеты на основе полиэтилена и алюминиевой фольги, либо в специальные термоусадочные вакуумные пакеты из полиэтилена.

Упакованный сыр хранится при температуре (20 ± 2) °С и относительной влажности воздуха не более 75 % в течение 12 месяцев.

Экономическая эффективность

Был произведен расчет энергозатрат на сушку полутвердых сыров с использованием разработанной многоступенчатой сушки и аналогичной сушки, но с использованием обычного способа подвода теплоты, который не менялся в ходе сушки, т.е. когда не меняется температура сушки, остаточное давление, длина волны, тепловая нагрузка. При осуществлении экономических расчетов учитывались затраты на работу сушильных ламп, вакуумного насоса и холодильной машины. Результаты представлены в табл. 8.

Таблица 8 – Расчет энергозатрат на обеспечение процесса сушки 1 кг полутвердых сыров

Вид сыра	Энергозатраты по статьям, кДж			
	Холодильная машина	Вакуум-насос	ИК-лампы	Всего
Разработанный ступенчатый способ сушки				
Голландский	106,7	295,6	2483,0	2885,3
Костромской	102,2	283,0	2355,3	2740,5
Пошехонский	93,7	259,4	2159,6	2512,7
Традиционный метод				
Голландский	117,6	325,8	2776,7	3220,1
Костромской	113,2	313,7	2673,8	3100,7
Пошехонский	102,8	284,5	2426,3	2813,6

На работу сушильных ламп приходится около 86% всех энергозатрат. Суммарные энергетические затраты непосредственно зависят от продолжительности процесса сушки, поэтому наиболее энергозатраты приходятся на сыр «Голландский». Обнаружено, что использование ступенчатого способа сушки дает возможность снизить энергозатраты в среднем на 10-12% по сравнению с традиционной вакуумной сушкой.

Таким образом, был доказан экономический эффект от использования разработанной многоступенчатой вакуумной сушки по сравнению с традиционной вакуумной сушкой. При разработанном способе первоначальные затраты на приобретение дополнительных сушильных ламп будут выше, однако себестоимость произ-

водства сухих сыров будет ниже вследствие снижения энергетических затрат на обезвоживание в нестационарном поле инфракрасного излучения.

ВЫВОДЫ

На основании проведенного диссертационного исследования были получены следующие выводы:

1. Проведен анализ форм связи влаги в полутвердых сырах. Определены периоды дегидратации воды и деструкции сухих веществ при термической обработке полутвердых сыров. Обнаружено, что наибольшая часть влаги в исследованных сырах: от 60,3 % («Пошехонский») до 69,7 % («Костромской») приходится на свободную влагу. Для сыра «Голландский» извлечение основной массы влаги наблюдается на температурном участке 73-172° С. Для сыров «Костромской» и «Пошехонский» температурные диапазоны лежат в пределах 78-196° С и 94-242° С соответственно. Температура, при которой начинается процесс деструкции веществ составляет 178, 192 и 211° С соответственно для сыров «Голландский», «Костромской» и «Пошехонский».

2. Подобраны эффективные технологические режимы вакуумной сушки полутвердых сыров: температура нагрева - 50° С, остаточное давление - 3-4 кПа, плотность теплового потока - 6 кВт/м², толщина слоя сушки - 10 мм. Указанные режимы позволяют получить сухие сыры высокого качества при относительно невысокой продолжительности сушки.

3. Проанализировано влияние длины волны инфракрасного излучения на качество сухих сыров и эффективность вакуумной сушки. При повышении длины волны излучения увеличивается температурный градиент по объему продукта. Наименьшая продолжительность сушки наблюдалась при длине волны излучения 1,0 мкм. Разработана трехступенчатая вакуумная сушка в нестационарном поле излучения. Установлена эффективность обезвоживания при расстоянии между сушильной лампой и продуктом в 20 см, что обеспечивает относительно равномерное распределение излучения на поверхности лотка с продуктом и высокое качество последнего при невысоких удельных энергозатратах (2,1÷2,4 кВт/кг влаги).

4. Исследованы качественные характеристики сухих полутвердых сыров – состав органических и жирных кислот, аминокислотный, белковый и витаминный состав, что позволило установить высокую степень сохранности термолабильных компонентов сыров. Обнаружено, что после сушки величина усадки полутвердых сыров составляет от 17,2 до 19,4%.

5. Проанализировано влияние вакуумной сушки на микроструктуру полутвердых сыров. После сушки сыр «Голландский» характеризуется развитой поверхностью с равномерно распределенными микропустотами со средним диаметром 10 мкм. Обезвоженный сыр «Костромской» обладает более гладкой поверхностью с жировыми включениями, размером 20-90 мкм. В сыре «Пошехонский» обнаружены трещины и микропоры, большинство из которых имеют диаметр менее 10 мкм.

6. Исследованы сорбционные свойства сухих полутвердых сыров в процессе хранения. Установлена высокая степень гигроскопичности сухих полутвердых сыров. Обнаружено, что интенсивность процесса сорбции снижается на протяжении всего срока хранения. При относительной влажности воздуха 40-70% равновесная влажность наступает спустя 2-6 суток хранения. При повышении относительной влажности воздуха наблюдается увеличение продолжительности установления равновесной влажности. Определены коэффициенты сорбции сухих полутвердых сыров, проведен анализ изотерм сорбции и десорбции. Выведены уравнения регрессии, позволяющие рассчитать равновесную влажность полутвердых сыров в зависимости от относительной влажности воздуха.

7. Разработана технология вакуумной сушки полутвердых сыров в нестационарном поле излучения. Доказана экономическая эффективность использования разработанного многоступенчатого способа сушки сыров. При использовании разработанного способа вакуумной сушки энергозатраты снижаются на 10÷12% по сравнению с традиционным методом.

**По материалам диссертации опубликованы следующие работы:
Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ**

1. Равнюшкин, Е.А. Баровакуумная сушка в зависимости от начальных температурных условий / Е.А. Равнюшкин, М.А. Брюханов // Вестник КрасГАУ. – 2015. - № 7. – С. 93-98.

2. Ермолаев, В.А. Анализ ступенчатого и импульсного способов подвода теплоты при вакуумном концентрировании молочных продуктов / В.А. Ермолаев, Д.А. Башков, М.А. Брюханов // Вестник КрасГАУ. – 2015. - № 5. – С. 102 – 107.

3. Брюханов М.А. Исследование форм связи влаги в полутвердых сырах // М.А. Брюханов, В.А. Ермолаев, Н.Г. Третьякова // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – Т. 39. - № 4. – С. 106-110.

Материалы конференций, конгрессов, симпозиумов, семинаров

4. Башков, Д.А. Исследование процессов высушивания в зависимости от ступеней вакуумного концентрирования / Д.А. Башков, М.А. Брюханов // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы международной научной конференции. – Кемерово, 2015. – С. 142-145.

5. Брюханов, М.А. Изменение свойств продуктов в процессе сушки / М.А. Брюханов // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы международной научной конференции. – Кемерово, 2015. – С. 147-149.

6. Брюханов М.А. Особенности вакуумной сушки пищевых продуктов / М.А. Брюханов // Материалы конференции «Наука: теория и практика – 2015». (URL: http://www.rusnauka.com/30_NTP_2015/Agricole/4_199643.doc.htm)

7. Брюханов М.А. Подбор температурного режима при вакуумной сушке полутвердых сыров / М.А. Брюханов // Новая наука: От идеи к результату. - 2016. - № 10-3. - С. 28-31.

8. Брюханов М.А. Подбор остаточного давления при вакуумной сушке полутвердых сыров / М.А. Брюханов // Кузбасс: образование, наука, инновации: материалы Инновационного конвента. - 2016. - С. 135-136.

9. Брюханов М.А. Подбор плотности теплового потока при вакуумном концентрировании творожной сыворотки / М.А. Брюханов // News of Science and Education. - 2017. - Т. 5. - № 4. - С. 040-042.

10. Брюханов М.А. Особенности вакуумной сушки пищевых продуктов / М.А. Брюханов // Пищевые инновации в биотехнологии: сборник тезисов VI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2018. – С. 112-113.

Патенты РФ

10. Патент № 2591731 Российская Федерация, МПК F26B 7/00, F26B 3/30. Способ баровакуумной сушки пищевых продуктов / В.А. Ермолаев, Д.А. Башков, М.А. Брюханов, Е.А. Равнюшкин. № 2015104838/13. Заявлено 12.02.2015; Оpubл. 20.07.2016.

11. Патент № 2608645 Российская Федерация, МПК A23C 1/00, A23C 3/02, A23C 3/07. Способ импульсного удаления влаги из продуктов/ В.А. Ермолаев, М.А. Брюханов, М.В. Онюшев. № 2015146947. Заявлено 30.10.2015; Оpubл. 23.01.2017.

Подписано в печать 28.03.2022. Формат 60x86/16. Тираж 100 экз. Объем 1,1 п.л. Заказ № ____.

Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия
650056, г. Кемерово, ул. Марковцева, 5.

Отпечатано в лаборатории множительной техники КузГСХА.
650056, г. Кемерово, ул. Марковцева, 5.