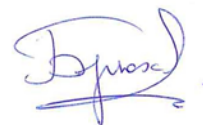


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия

На правах рукописи

БРЮХАНОВ Максим Андреевич



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНОЙ СУШКИ
ПОЛУТВЕРДЫХ СЫРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСО-
БАМИ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ**

05.18.04 - Технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодиль-
ных производств

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

В.А. Ермолаев

Кемерово 2022

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СУШКИ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ | 9 |
| 1.1. Изменение свойств высушиваемого объекта в процессе сушки..... | 9 |
| 1.2. Особенности вакуумной сушки пищевых продуктов..... | 22 |
| 1.3. Теоретические основы нагрева и сушки инфракрасными лучами... | 33 |
| 1.4. Анализ свойств полутвердых сыров как объектов сушки..... | 41 |
| 1.5. Заключение по литературному обзору, цели и задачи исследования..... | 45 |
| ГЛАВА 2. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ | 48 |
| 2.1. Схема проведения экспериментальных исследований | 48 |
| 2.2. Методы и объекты исследований | 50 |
| 2.3. Описание экспериментальной установки..... | 53 |
| ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ПОЛУТВЕРДЫХ СЫРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ | 56 |
| 3.1. Формы влаги в зрелых сырах..... | 56 |
| 3.2. Определение технологических режимов вакуумной сушки полутвердых сыров..... | 66 |
| 3.2.1. Температура нагрева..... | 66 |
| 3.2.2 Остаточное давление..... | 72 |
| 3.2.3 Плотность теплового потока..... | 78 |
| 3.2.4 Толщина слоя сушки..... | 83 |
| 3.3. Исследование влияния длины волны инфракрасного излучения на качество полутвердых сыров и эффективность сушки..... | 86 |
| 3.3.1. Сушка при различной длине волны..... | 86 |
| 3.3.2. Сушка в нестационарном поле излучения..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.3. Влияние пространственного расположения излучателей..... | 95 |
| 3.4. Качественные характеристики сыров вакуумной сушки..... | 100 |
| 3.4.1. Усадочные явления в процессе вакуумной сушки..... | 100 |
| 3.4.2 Состав органических и жирных кислот..... | 102 |
| 3.4.3 Витаминный состав..... | 104 |
| 3.4.4 Электрофоретическое исследование белкового компонента.. | 105 |
| 3.4.5 Аминокислотный состав..... | 108 |
| 3.5. Анализ микроструктуры сыров..... | 109 |
| 3.6. Исследование сорбционных свойств сыра в процессе хранения..... | 115 |
| 3.7. Разработка технологии вакуумной сушки полутвердых сыров..... | 122 |
| 3.8. Экономическая эффективность | 124 |
| Выводы..... | 126 |
| Список литературы..... | 128 |
| Приложение..... | 147 |

ВВЕДЕНИЕ

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.

Вышеуказанный 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. Влияние последнего параметра на процесс вакуумной сушки изучено довольно слабо. В работах А.С. Гинзбурга затрагивается данная тема, однако дальнейшего широкого развития она не получила.

Помимо А.С. Гинзбурга 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.

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. [48]

Стоит отметить, что на эффективность вакуумной сушки продуктов, в том числе сыров, оказывает влияние ряд технологических факторов: температура нагрева, остаточное давление, плотность теплового потока, толщина слоя сушки, а также способ подвода теплоты.

Таким образом, 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

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.

Была произведена выработка опытной партии сухих полутвердых сыров - «Голландский», «Костромской» и «Пошехонский», общим объемом 20 т. на ООО «Масло».

Получено 2 патента РФ на способ баровакуумной сушки пищевых продуктов [92] и способ импульсного удаления влаги из продуктов [93].

Методология и методы исследований

При проведении исследований использовали как стандартные общепринятые, так и оригинальные методики определения физико-химических, органолептических и других свойств объектов исследований. Отбор проб и их подготовку к анализу осуществляли в соответствии ГОСТ 9225-84 и ГОСТ 26809-86. Формы связи влаги в продукте определяли методом неизотермического анализа на дериватографе. Содержание влаги в сырах определяли с помощью ускоренного метода на приборе Чижовой, путем высушивания навески образца по ГОСТ 3626-73 и ГОСТ Р 51464-99.

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 сыров до и после сушки осуществляли на растровом сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6390 LA. Анализ аминокислотного состава осуществляли с помощью ионообменной хроматографии на аминокислотном анализаторе ARACUS.

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), Новая наука: От идеи к результату (г. Уфа), Кузбасс: образование, наука, инновации (г. Новокузнецк), News of Science and Education (Прага) и др.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СУШКИ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ

В настоящей главе приведены сведения об изменениях свойств продуктов в процессе сушки, освещены работы по исследованию микроструктуры продуктов до и после обезвоживания. Рассмотрены особенности вакуумной сушки пищевых продуктов, представлены различные способы данного вида обезвоживания и соответствующие установки. Приведены теоретические основы инфракрасной сушки, проанализированы особенности энергоподвода с помощью инфракрасных лучей.

1.1. Изменение свойств высушиваемого объекта в процессе сушки

Сушка представляет собой один из наиболее простых и эффективных способов консервирования пищевых продуктов, известных еще с древних времен [9, 122, 48, 81, 103, 115]. Обезвоживание до влагосодержания менее 5% обуславливает существенное замедление жизнедеятельности микроорганизмов, вызывающих порчу или полное их уничтожение. Это дает возможность значительно увеличить сроки годности пищевых продуктов. Кроме того, благодаря значительной усадке и уменьшению массы после сушки удается сократить затраты на транспортировку и хранение [43, 107].

В ходе сушки из-за ряда факторов наблюдаются существенные изменения в структуре продукта, его физико-химического состава, вкусовых качеств, микробиологических свойств, реологических характеристик и др. [12, 105]. При правильно подобранных режимах сушки продукт получают высокого качества. При этом стараются минимизировать температуру нагрева чтобы сохранить ценные термолабильные компоненты продукта [2, 63, 124, 98].

В ходе удаления влаги у продуктов наблюдается заметная усадка – уменьшение объема. При этом степень усадки на различных стадиях сушки

зависит от вида высушиваемого материала [17, 59]. Если рассматривать пищевые продукты, то усадка для них наблюдается на всех стадиях сушки. Многие продукты (молочные, мясные, овощи, фрукты и т.д.) являются капиллярно-пористыми, для них усадка осуществляется равномерно на протяжении всего процесса обезвоживания. Для таких продуктов усадка может быть рассчитана путем определения объема продукта по представленной ниже формуле [59, 74]:

$$V = V_c(1 + \beta_v W), \quad (1.1)$$

где V – объем продукта, см^3 ;

V_c – объем абсолютно сухого продукта, см^3 ;

β_v – коэффициент объемной усадки (зависит от вида продукта и является индивидуальным);

W – влагосодержание.

Коэффициент объемной усадки β_v представляет собой отношение относительного уменьшения объема продукта к произведению объема абсолютно сухого продукта на влагосодержание:

$$\beta_v = \frac{dV}{V_c W}, \quad (1.2)$$

Указанная выше формула может применяться только в случае небольшого разницы во влагосодержании в различных точках объема продукта. В случае, когда данная разница является существенной, то будет происходить образование трещин в продукте в ходе сушки из-за того, что наружные слои сокращаются быстрее внутренних. Это может наблюдаться при высокой скорости обезвоживания при так называемых «жестких» режимах сушки. В таком случае зависимость между размерами продукта и его влагосодержанием

становится нелинейной и линейные размеры продукта могут быть найдены по следующей формуле [73]:

$$l = l_0(1 + \beta'_v W)^n, \quad (1.3)$$

где l – линейный размер продукта в конкретный момент времени сушки, м;

l_0 – линейный размер абсолютно сухого продукта, м;

β'_v – коэффициент линейной усадки, отнесенный к разнице средних влагосодержаний;

n – постоянная для данного продукта.

Как уже было отмечено, мягкие, щадящие режимы сушки обеспечивают сохранение изначальной структуры поверхностных слоев продукта. В случае высокой скорости нагрева и сушки происходит растрескивание поверхностной оболочки материала и нарушение структуры продукта. Это обусловлено появлением большого градиента температуры и влагосодержания между поверхностными слоями и центром продукта, что в свою очередь вызывает образование напряжений сверх допустимого [32, 131].

Способ сушки существенно влияет на усадку продукта и возможное возникновение трещин в его оболочке. Наиболее щадящим в этом плане является сублимационная сушка при которой влага в продукте замораживается и сублимирует в окружающую среду, переходя в пар. При таком способе практически в полной мере сохраняется исходная форма продукта. При конвективной сушке во флюидизационном слое в случае нагрева продукта свыше 100°C влага в продукте перемещается из центра к периферии и в окружающую среду исключительно в парообразном состоянии. В этом случае давление, образующееся в продукте уравнивает силы, вызывающие усадку [79]. Если обезвоживать продукт аналогичным способом, но с температурой меньше температуры кипения, то наблюдается равномерная усадка так как

влага в продукте перемещается в жидком виде, а давление внутри продукта меньше давления окружающей среды [38, 137].

Если обезвоживать продукт воздухом с достаточно высокой влажностью, то из-за возникающих механических напряжений будут образовываться поры [73]. Это явление наиболее сильно проявляется в период падающей скорости сушки и зависит от характера усадки материала.

При сушке продукта наблюдается постоянное увеличение концентрации сухих веществ, особенно на наружных слоях. Как правило, такой эффект является нежелательным, так как приводит к изменению цвета продукта и структурно-механические характеристики наружного слоя начинают заметно отличаться от остального объема продукта. Устранить данное явление можно за счет создания условий, при которых влага будет испаряться внутри самого продукта. Для этого необходимо понизить скорость перемещения влаги и одновременно увеличить скорость сушки за счет правильно подобранных режимов [149]. Эффективным средством является изменение температурного градиента в объеме материала [18].

Скорость переноса сухих веществ в продукте в ходе сушки является важным фактором. Например, при бланшировке картофеля за счет сильного нагрева наружных слоев создается заметный температурный градиент по объему продукта и влага, содержащая витамин С перемещается к центру картофелины. Благодаря этому удается сохранить ценные вещества в сердцевине картофелины, что является важным, поскольку наружные слои данного продукта удаляются как отходы.

Сушка продуктов, особенно с высокой температурой оказывает существенное влияние на органолептические свойства и физико-химический состав продукта в результате ряда биохимических преобразований [99].

При обезвоживании значительно меняется не только форма, но и цвет из-за карамелизации сахаров и различных ферментативных реакций. Устранить данный недостаток можно, например путем предварительной обработки продукта раствором лимонной или аскорбиновой кислоты.

Сушка при высокой температуре нагрева может сопровождаться подгоранием продукта с сопутствующим изменениями вкусовых качеств. При этом происходит необратимая денатурация термолабильных веществ. Образование подгорания зависит не только от температуры, но и от продолжительности сушки. В этом плане выигрывает распылительная сушка, при которой частицы продукта контактируют с нагретым воздухом крайней малое время и в результате они не успевают подгореть. Таким образом, при распылительной сушке продукт в достаточно высокой степени сохраняет органолептические показатели [10].

Другим важным фактором сушки является формирование твердого слоя на периферии продукта, что затрудняет дальнейшую миграцию влаги из центра на поверхность и снижает скорость сушки. Решить данную проблему можно за счет измельчения продукта перед обезвоживанием. В случае же сушки крупных, не измельченных продуктов можно устанавливать невысокую температуру нагрева на начальных этапах сушки.

После сушки может наблюдаться потеря вкусовых качеств и характерного запаха, что вызвано потерей летучих веществ. Возможным решением данной проблемы является конденсация влаги из паров продукта в ходе сушки и дальнейшее добавление к сухому продукту концентратов, получаемых из нее [65].

Температура сушки в значительной степени влияет на регидратирующую способность обезвоженного продукта. Так, например, при высокой температуре сушки происходит денатурация и затвердевание белков, пектина и амилопектина, что в свою очередь вызывает ухудшение регидратирующей способности.

Большой интерес с научной точки зрения представляют собой исследования микроструктуры продуктов до и после сушки. Достаточно много зарубежных работ посвящено данному вопросу. Ниже рассмотрены некоторые из них.

Авторами работы [134] были проведены исследования по исследованию микроструктуры фруктов при сушке инновационным способом. Для этих целей использовался комбинированный способ обезвоживания, включающий в себя чередование цикла прогрева продукта теплоносителем при температуре $60\div 70^{\circ}\text{C}$, импульсное вакуумирование рабочей камеры до 15 мбар (при этом происходит охлаждение продукта и вытягивание влаги на поверхность), выдержка в таком состоянии в течение 15 мин. и сброс вакуума до атмосферного давления.

На рис. 1.1 представлено изменение микроструктуры банана в процессе вышеуказанной сушки. Цифрами обозначен номер цикла [134].

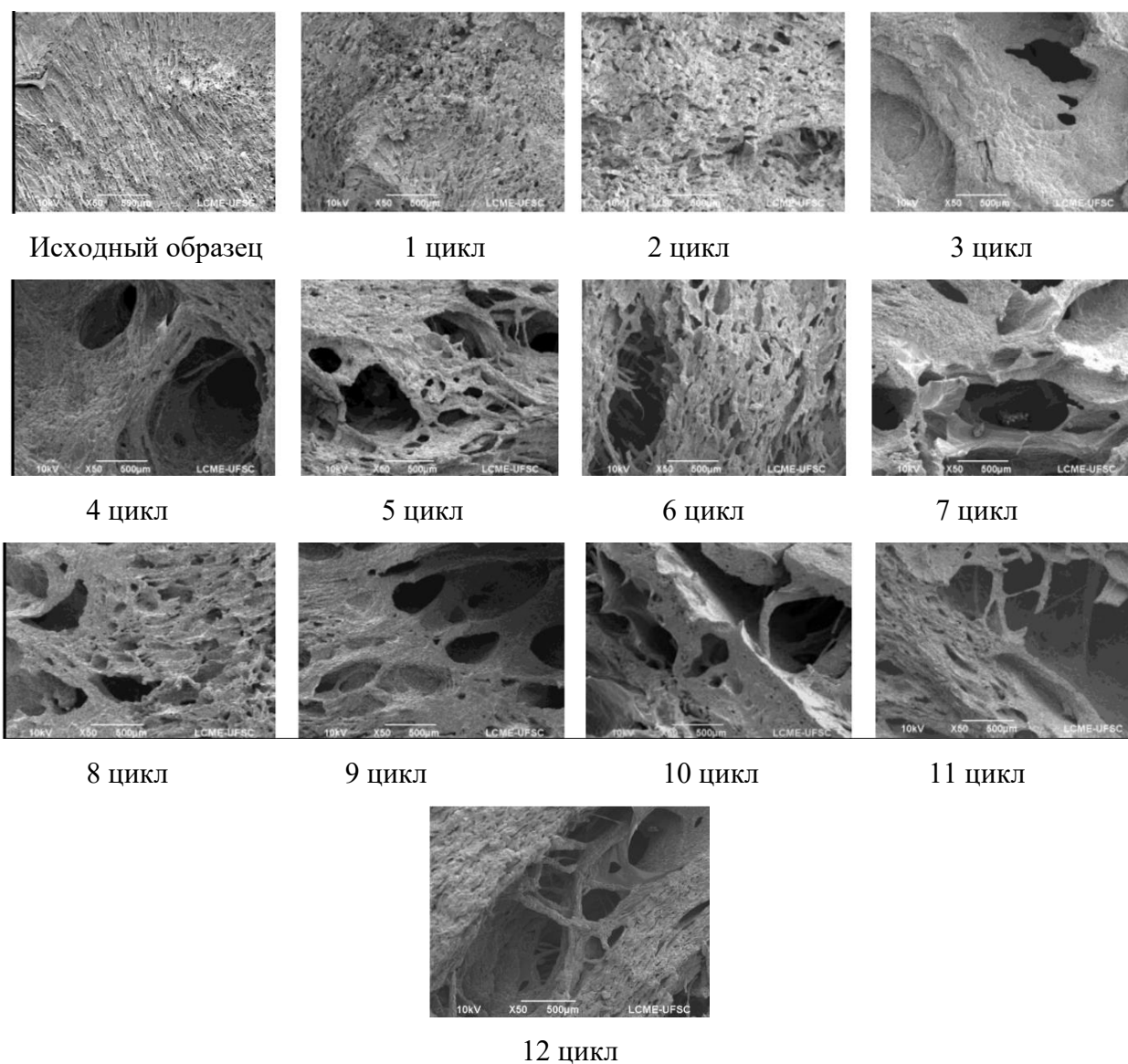


Рисунок 1.1 – Изменение микроструктуры банана в процессе комбинированной сушки (X50)

Исходный образец банана характеризовался упорядоченной достаточно однородной плотной структурой с размером пор менее 100 мкм. В процессе комбинированной сушки происходило образование крупных пор с последующим формированием хаотичной структуры, содержащей микро- и макропоры. Наиболее существенное изменение микроструктуры банана наблюдалось на 3-4 циклы сушки, которые соответствовали 30÷40 мин. после начала процесса обезвоживания [134].

Для сравнения авторами этой же работы представлены фотографии микроструктуры банана при различных способах сушки (рис. 1.2) [134].



Рисунок 1.2 – Сравнение микроструктуры банана при различных способах сушки (X50)

При микроволновой сушке наблюдается достаточно однородная пористая структура с размером пор менее 150 мкм. При вакуумной и конвективной сушке структура менее однородная, в некоторых местах наблюдаются деформации и разломы. При комбинированной и комбинированной + вакуумной сушке образуются крупные поры с размером более 500 мкм. При этом

в последнем способе сушки структура мелких пор более однородная, чем в случае комбинированной сушки [134].

В работе [127], посвященной также исследованию микроструктуры сушеного банана с помощью компьютерной обработки изображений удалось определить частоту пор в зависимости от их размера при различных способах обезвоживания (рис. 1.3).

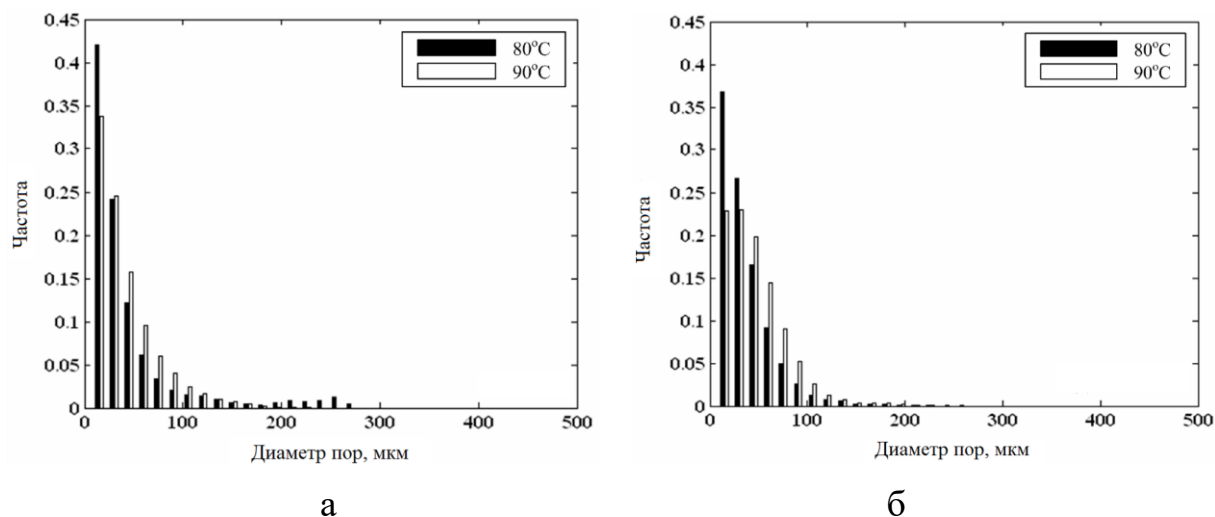


Рисунок 1.3 – Частота пор микроструктуры обезвоженного банана: а – конвективно-вакуумная сушка; б – конвективно-вакуумная инфракрасная сушка

Размер микропор структуры сушеного банана во многом зависел от температуры сушки – при ее снижении наблюдалось увеличение частоты более крупных пор, размером свыше 200 мкм (рис. 1.3а) и микропор, размером менее 30 мкм. При температуре 90°C разброс по размерам пор был меньше, чем при температуре 80°C. При этом использование комбинированного способа сушки – совмещение конвективно-вакуумного обезвоживания с инфракрасным нагревом позволяет избежать образования крупных пор, размером более 150 мкм (рис. 1.3б) [127].

Другая статья [144] была посвящена исследованию микроструктуры винограда в процессе конвективной сушки. На рис. 1.4 изображены фотографии структуры клеток винограда в процессе обезвоживания потоком воздуха, нагретого до температуры 40°C.

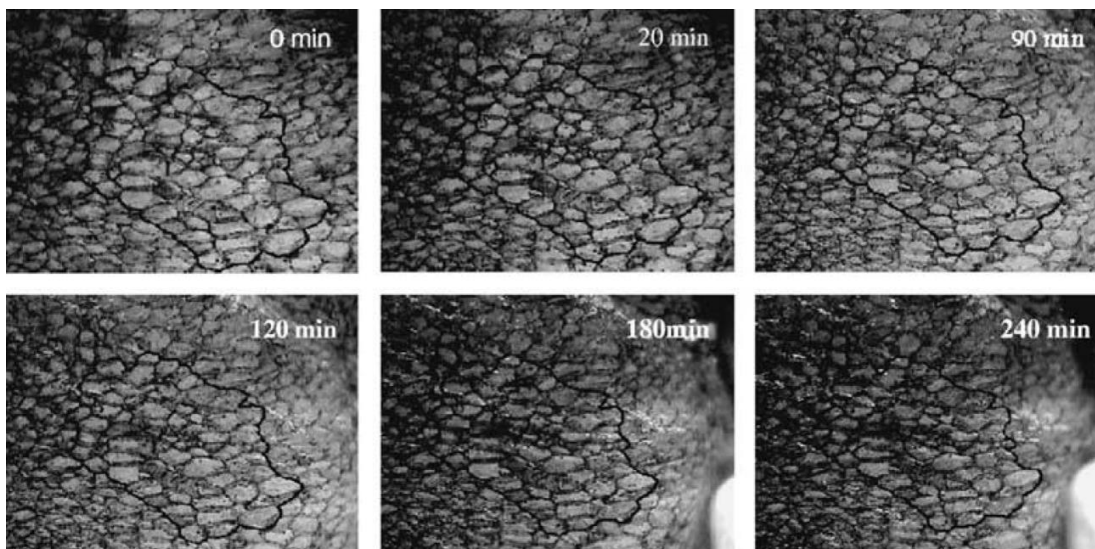


Рисунок 1.4 – Микроструктура клеток винограда в процессе конвективной сушки °C (X25)

В процессе конвективного обезвоживания наблюдалась постепенная усадка клеток винограда. Через 90 мин. после начала процесса сушки в некоторых областях стали появляться разрывы клеточных стенок. Несмотря на некоторые повреждения клеток тканей винограда, их форма и структура сохранилась к концу процесса обезвоживания. С помощью обработки полученных изображений было рассчитано растяжение клеток, результаты представлены на рис. 1.5 [144].

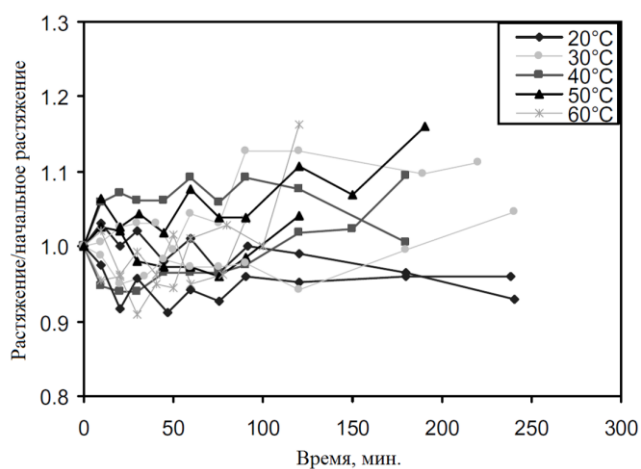
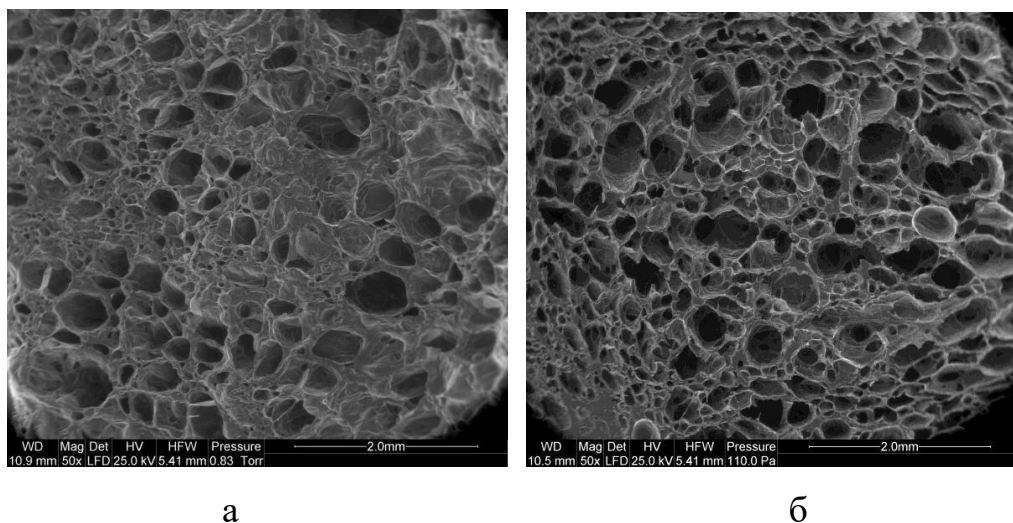


Рисунок 1.5 – Растяжение клеток ткани винограда при конвективной сушке

При температуре воздуха 20°C наблюдалось некоторое сжатие клеток винограда с коэффициентом порядка 0,95. При температурах сушки 30 и 40 °C степень растяжения клеток составляла 1,05÷1,07. В случае, когда температура теплоносителя составляла 50 и 60 °C коэффициент растяжения клеток был равен порядка 1,1 [144].

Проводились исследования микроструктуры киви, высушенной сублимационным способом [138]. При этом производился анализ влияния предварительного осмотического обезвоживания на структуру ткани продукта (рис. 1.6).



а

б

Рисунок 1.6 – Микроструктура лиофилизированной ткани киви: а – без предварительной обработки; б – с предварительным осмотическим обезвоживанием

Осмотическое обезвоживание вызывало определенные изменения в структуре растительной ткани. В процессе предварительного осмотического обезвоживания происходил одновременно процесс диффузии воды из тканей продукта в осмотический раствор и процесс переноса сахарозы в межклеточное и внеклеточное пространство, что могло являться причиной повреждений тканей на микроуровне. Микроструктура необработанного плода киви после сублимационной сушки характеризовалась округлой формой клеток (рис. 1.6 а) в то время как структура предварительно обработанной ткани состояла из

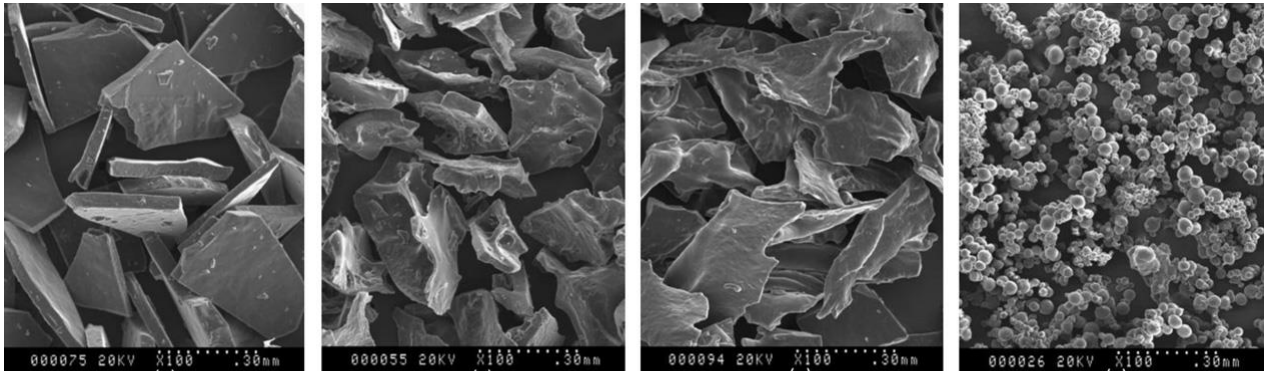
клеток неправильной формы, которые были сильно искажены, во многих местах появились трещины в клеточных стенках (рис. 1.6 б), что могло в определенной степени влиять на характер последующей сублимационной сушки [138].

Способ сушки в значительной степени влияет на микроструктуру готового продукта. В работе [129] исследовали микроструктуру ткани манго при различных методах обезвоживания (рис. 1.7).

Микроструктура манго, высушенного кондуктивным способом на конвейерной ленте (рис. 1.7 а, д), состояла из относительно гладких элементов равномерной толщины, чего удалось достичь за счет сушки в тонком слое, высотой $0,5 \div 0,7$ мм. Гладкие стороны образовавшихся элементов указывают на хорошую сыпучесть и низкую восприимчивость к окислению за счет меньшей поверхности. Манго, обезвоженное сублимационным методом (рис. 1.7 б, е), характеризовалось скелетообразной структурой, которая была более пористая по сравнению с остальными способами сушки. Это обусловлено тем фактом, что при сублимационной сушке удаление влаги осуществляется из кристаллической фазы, что предотвращает усадку и разрушение исходной структуры и формы [8].

Структура манго, обезвоженного на барабанной сушилке (рис. 1.7 в, ж), состояла из более мелких частиц неправильной формы с острыми краями и значительными углублениями, образованными в результате дробления в порошок. В случае распылительной сушки манго (рис. 1.7 г, з) структура состояла из сферических и овальных частиц, гладкая форма которых вызвана особенностями данного вида сушки при температуре теплоносителя 190°C . Такая структура обусловлена высокой пористостью наряду с сублимационной сушкой [129].

Увеличение – X100



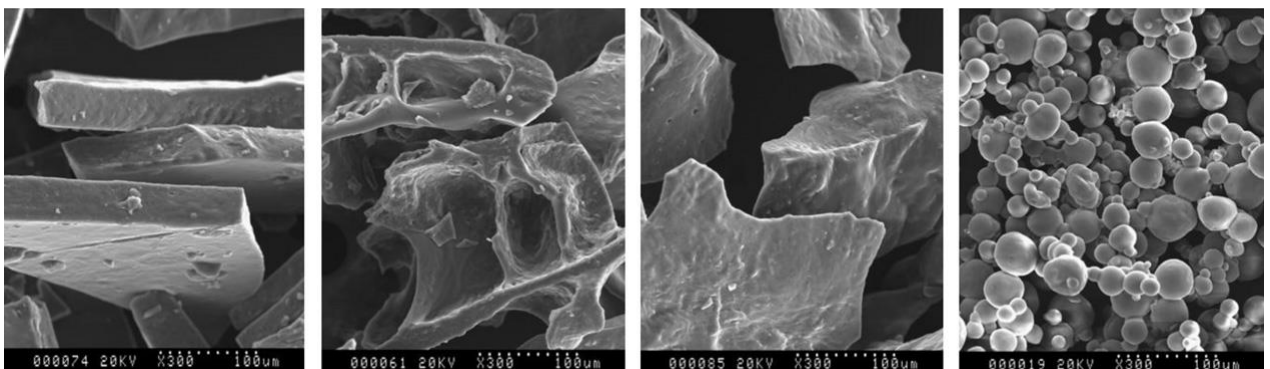
а

б

в

г

Увеличение – X300



д

е

ж

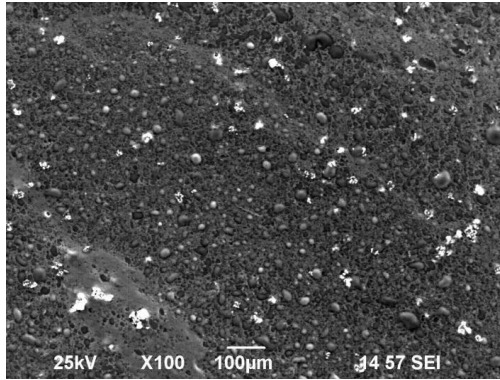
з

Рисунок 1.7 – Микроструктура манго, высушенного: а, д - кондуктивно в тонком слое; б, е – сублимационно; в, ж – кондуктивно в барабанной сушилке; г, з – распылительным методом

Сравнение того или иного вида сушки на уровне микроструктуры проводилось также в работе [82]. На рис. 1.8 представлены результаты анализа изменения микроструктуры сыра «Покровский» при вакуумной и сублимационной сушке.

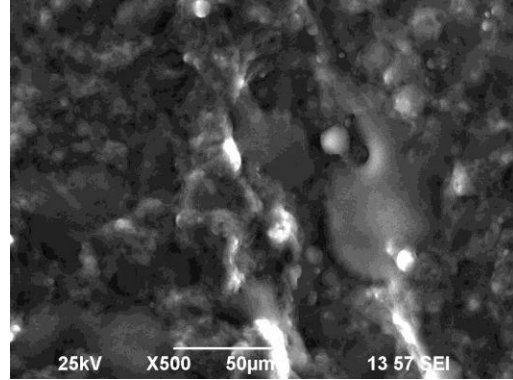
Свежий сыр характеризуется упорядоченной структурой с ровной поверхностью, что свидетельствует о достаточно высоком влагосодержании. Структура включает в себя глобулы жира, диаметром порядка $10 \div 30$ мкм и микрокапилляры с влагой, размер которых составляет $2 \div 7$ мкм [82].

Увеличение X100

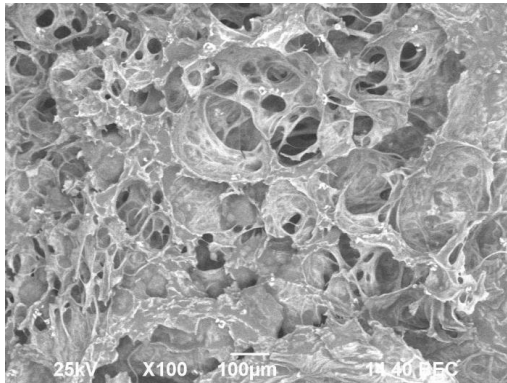


а

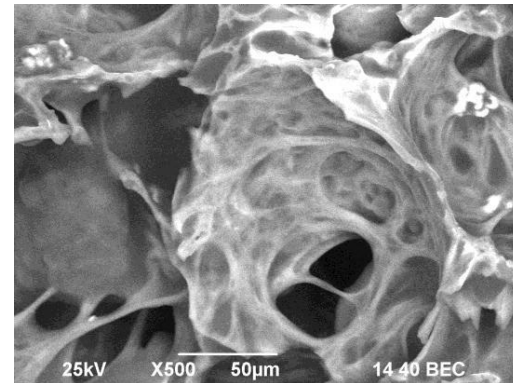
Увеличение X500



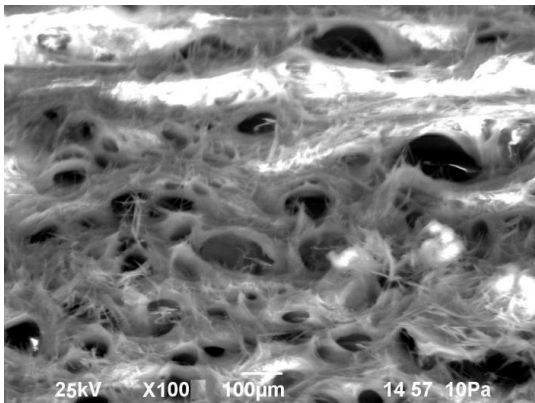
б



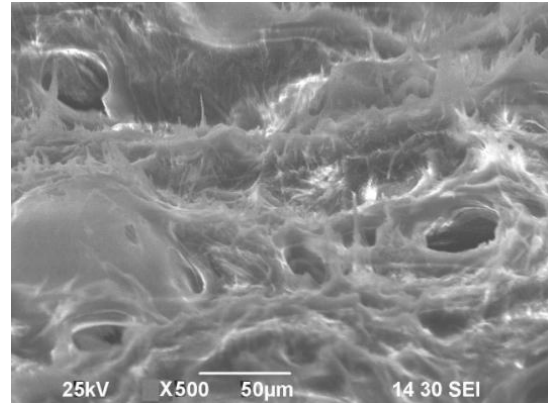
в



г



д



е

Рисунок 1.8 – Микроструктура сыра «Покровский»: а, б – до сушки; в, г – после вакуумной сушки; д, е – после сублимационной сушки

Сыр, высушенный вакуумным способом, обладает более развитой структурой, чем при сублимационном способе обезвоживания. Ранее было отмечено, что причиной этому является особенность удаления влаги при лиофилизации, которая позволяет сохранить исходную форму продукта. При

вакуумной сушке вследствие быстрого вскипания влаги в сыре и его интенсивной миграции к наружным слоям происходит деформация структуры.

Размеры капилляров высушенного сыра в обоих случаях варьировал от 5 до 100 мкм. Жир высушенного сыра распределен по поверхности в виде тонкой пленки, а также внутри белкового матрикса. В структуре сухого сыра обнаружены белковые прослойки, толщиной $5 \div 15$ мкм [82]. Фотографии, представленные на рис. 1.8, дают основания утверждать, что в процессе вакуумной и сублимационной сушки не происходило вытапливания жира, что свидетельствует о правильном подборе режимов обезвоживания и высоком качестве сухого продукта.

Таким образом, были рассмотрены основные процессы, происходящие в пищевых продуктах при сушке и влияющие на его качественные показатели. Установлено, что температура и способ сушки во многом влияет на микроструктуру продукта и на его органолептические, физико-химические и другие характеристики.

1.2. Особенности вакуумной сушки пищевых продуктов

Известно, что сушка при атмосферном давлении предполагает длительный контакт продукта с воздушной средой, содержащей кислород, что приводит к окислительным процессам, а высокие температуры нагрева обуславливают низкое качество готового продукта. Вакуумная сушка представляет собой процесс удаления влаги в условиях давления ниже атмосферного, но выше тройной точки воды. За счет использования вакуума удается интенсифицировать процесс сушки и избежать вышеперечисленных недостатков традиционной атмосферной сушки [45, 26, 120, 60, 108, 136].

Ввиду своей эффективности вакуумная сушка получила достаточно широкое распространение в России и за рубежом при производстве пищевых полуфабрикатов, быстрорастворимых фруктовых и овощных соков и пюре, готовых блюд, пищевых добавок и т.д. [16, 27, 53, 54, 140] Продукты вакуум-

ной сушки характеризуются рядом преимуществ по органолептическим показателям, возможности гранулирования, относительной невысокой себестоимости выработки продукта и оборудования [43, 111, 109, 147].

Как правило, вакуумная сушка протекает при давлении $5\div 10$ кПа и щадящих температурных режимах, обеспечивающих благоприятные условия для сохранения нативных свойств продукта и его термолабильных компонентов [44].

Вакуумная сушка основана на трех физических закономерностях:

- зависимости скорости диффузии от температуры;
- зависимости скорости диффузии от давления;
- зависимости температуры кипения воды от давления.

При создании пониженного давления в камере сушки влага из продукта под разностью давлений начинает интенсивно перемещаться на поверхность и испаряться. При этом снижение температуры кипения дает возможность проводить процесс сушки при невысоких температурах [148]. Источниками нагрева при этом могут быть инфракрасные лампы, микроволновое излучение, кондуктивный энергоподвод, комбинированные источники и т.д. [83, 64, 106, 132]

В процессе вакуумной сушки свободная влага, находящаяся внутри клеток продукта, удаляется первой. На этом этапе сушки больше всего происходит деформация и образование трещин и разрывов в тканях структуры материала. После этого происходит удаления связанной влаги, находящейся в микро- и макрокапиллярах клеток [67, 28].

Большинство пищевых продуктов представляют собой капиллярно-пористые тела, в которых перенос влаги при вакуумной сушке происходит в виде пара и жидкости и зависит от многих факторов: внутренней структуры сухого скелета, содержания влаги, интенсивностью внешних воздействий и т.д. [142, 74, 75] Движение жидкости в продукте при этом обусловлено рядом механизмов: диффузии, фильтрации, капиллярного и пленочного течения жидкости, термодиффузии и других явлений. Градиент давления внутри про-

дукта возникает в результате интенсивного испарения жидкости и сопротивления пористой структуры движению образующегося пара на поверхность продукта [84]. Поэтому на перенос жидкости оказывает влияние давление парогазовой смеси. Таким образом, на интенсивность движения влаги в большей степени зависит от молярного переноса, чем от диффузионного и капиллярного переноса влаги [4, 5, 73, 76].

Для интенсификации испарения влаги, фильтрационного переноса пара и жидкости в продукте при вакуумной сушке используют чередование циклов вакуумирования и нагрева продукта – так называемая вакуум-импульсная сушка [94, 47, 121, 123, 15, 58].

В работе [104] предлагается метод двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки, предполагающий 2 этапа обезвоживания. На первом этапе происходит удаление поверхностной влаги конвективным методом, температура продукта при этом нагревается от начальной до температуры мокрого термометра.

После удаления свободной влаги температура продукта повышается, стремясь к температуре теплоносителя. Если не снизить температуру, то начинается разрушение термолабильных компонентов продукта, например, витаминов. Однако снижение температуры сушки приводит к повышению ее продолжительности. Поэтому на втором этапе обезвоживания используют вакуумирование, вызывающее градиент давления, которое в свою очередь приводит к возникновению молярного движения парогазовой смеси внутри продукта [113].

Математическая модель процесса вакуум-импульсной сушки пористого цилиндрического тела может быть описана граничными условиями [71, 72].

Для уравнения переноса теплоты на оси симметрии и на поверхности продукта они выглядят следующим образом [4]:

$$\begin{aligned}
r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow 0} &= 0, \\
-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} &= \alpha [T - T_{cp}(\tau)]
\end{aligned}
\tag{1.4}$$

Для уравнения переноса пара:

$$\begin{aligned}
r \frac{k\rho_{\Pi} f'_{\Pi}(u)}{\mu_{\Pi}} \frac{\partial \rho_{\Pi}}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow 0} &= 0, \\
\frac{k\rho_{\Pi} f'_{\Pi}(u)}{\mu_{\Pi}} \frac{\partial \rho_{\Pi}}{\partial r} \Big|_{r=R} &= -\beta_{p0} [p_{\Pi} - p_{cp}(\tau)] \frac{p_0}{p}
\end{aligned}
\tag{1.5}$$

Для уравнения переноса жидкости:

$$\begin{aligned}
r \frac{k\rho_{жс} f'_{жс}(u)}{\mu_{жс}} \frac{\partial \rho_{жс}}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow 0} &= 0, \\
\rho_{жс} \Big|_{r=R} &= \rho_{жс}(\tau).
\end{aligned}
\tag{1.6}$$

где $D_{\Pi} = k\rho_{\Pi} f'_{\Pi}(u)/\mu_{\Pi}$, $D_{жс} = k\rho_{жс} f'_{жс}(u)/\mu_{жс}$ – эффективные коэффициенты фильтрации пара и жидкости, кг/(м·м·Па); $f'(u)$ – относительная фазовая проницаемость; k – коэффициент проницаемости, м²; ρ – давление, Па; r – радиальная координата, м; R – радиус образца, м; T – температура, К; u – влагосодержание материала, кг/кг; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); λ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; ρ – плотность, кг/м³; τ – время, с.

В случае, когда вакуумная сушка протекает без изменений давления и при использовании инфракрасного излучения, то дифференциальные уравнения внутреннего теплообмена можно представить следующим образом [116, 119]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{r_{II} E}{c} a_m \nabla^2 U - \frac{c_{ж} p_{ж}}{c_{np} p_o} v_{ж} \nabla t + \frac{q_v}{c_{np} p_o} + E r_{II} \frac{a_m}{c} \delta_p \nabla^2 P \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 U + a_m \delta \nabla^2 T + \frac{\lambda_p}{p_m} \nabla^2 P \end{array} \right. \quad (1.7)$$

где p_m – плотность материала; c – теплоемкость материала; $\frac{\partial U}{\partial \tau}$ – изменение влагосодержания по времени; $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – изменение температуры по времени $c_{ж}$ – теплоемкость жидкости; $p_{ж}$ – плотность жидкости; c_{np} – приведенная теплоемкость материала; p_o – плотность сухого вещества материала; $v_{ж}$ – линейная скорость перемещения жидкости (м/ч); q_v – плотность теплового потока излучения; E – критерий фазового превращения; r_{II} – удельная теплота парообразования; $a_m = \tilde{a}_m / (1 - E)$; \tilde{a}_m – коэффициент влагопроводности; δ_p – относительный коэффициент фильтрационного потока влаги; ∇P – градиент давления; ; λ_p – коэффициент фильтрационного переноса влаги; ∇U – градиент влагосодержания; ∇T – градиент температуры.

Приведенная теплоемкость материала определяется по следующей формуле [73]:

$$c_{np} = c_{с.вещ.} + c_{ж} U \quad (1.8)$$

где $c_{с.вещ.}$ – теплоемкость сухого вещества материала; U – влагосодержание материала.

В первом приближении, основываясь на литературных данных по проницаемости материалов инфракрасным излучением величину q_v можно определить из уравнения [35]:

$$q_v = q_o e^{-S(R-x)} \quad (1.9)$$

где q_0 - плотность теплового потока абсолютно черного тела; R – определяющий геометрический размер тела; x - расстояние между рассматриваемым слоем и поверхностным слоем тела.

Для осуществления процесса сушки разработан достаточно широкий спектр установок, отличающихся производительностью, способу подвода теплоты и т.д.

На рис. 1.9. изображена схема вакуумной сушильной установки [87].

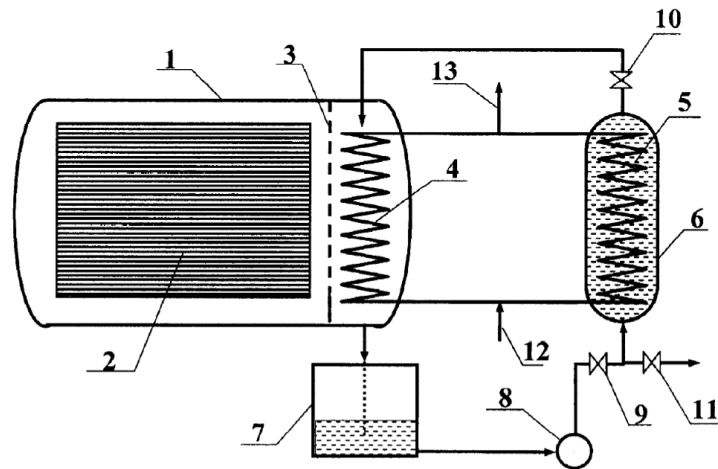


Рисунок 1.9 – Схема вакуумной сушильной установки: 1 – сушильная камера; 2 – блок нагревательных элементов; 3 – жалюзийная перегородка; 4, 5 – соответственно внутренняя и внешняя охлаждаемая секция ледового конденсатора; 6 – емкость; 7 – накопительная емкость; 8 – насос; 9, 10, 11 – вентили; 12 – линия подачи хладагента в конденсатор; 13 – линия вывода хладагента из конденсатора

Сушка продукта осуществляется в рабочей камере 1 путем подвода теплоты от блока нагревательных элементов 2. Испаряющаяся влага конденсируется и замораживается в двух секциях ледового конденсатора, сначала в первой секции, находящейся в вакуумной полости сушильной камеры, за счет смачивания поверхностей конденсатора влагосодержащим циркулирующим раствором с низкой температурой замерзания. Затем охлаждение происходит в другой секции ледового конденсатора, находящейся вне вакууми-

руемого объема и не контактирующей с поглощаемыми парами влаги. Такой способ конденсации позволяет снизить нагрузку на холодильную установку сушильного агрегата.

На рис. 1.10 представлена установка термовакуумной сушики [42].

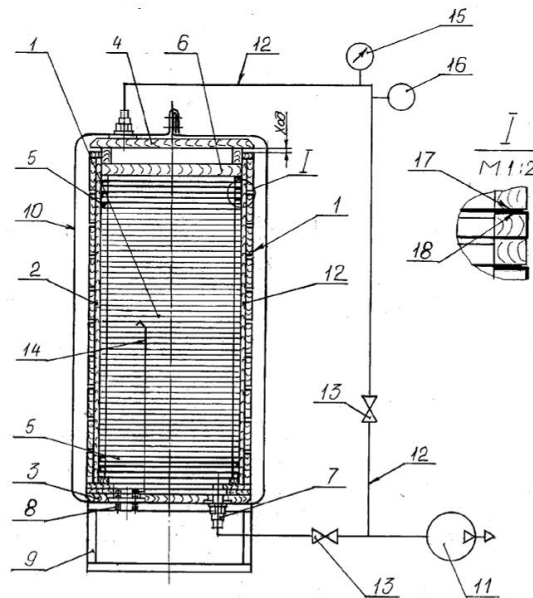


Рисунок 1.10 - установка термовакуумной сушики: 1 – деревянный корпус; 2 – стенки корпуса; 3 – дно корпуса; 4, 6 – съемные крышки; 5 – лотки; 7 – вакуумный патрубок; 8 – токоотвод; 9 – подставка; 10 – вакуумная оболочка корпуса; 11 – вакуум-насос; 12 – вакуумный трубопровод; 13 – запорная арматура; 14, 15, 16 – системы контроля параметров сушики; 17, 18 – места электрического контакта между лотками

Продукт укладывается на лотки 5, установленные в рабочей камере в определенной последовательности, на которые подается ток для разогрева продукта. Лотки с продуктом зафиксированы в корпусе 1. Сушка осуществляется при давлении $10 \div 20$ мм рт. ст., которое создается вакуумным насосом 11. Откачка паровоздушной смеси осуществляется через трубопровод 12 и вакуумную запорную арматуру 13. Параметры сушики, такие, как температура, давление и влажность регулируются системой контроля 14, 15, и 16 соответственно.

Установка для вакуумной сушки жидких продуктов, изображенная на рис. 1.11 [86], может использоваться в пищевой промышленности для большинства продуктов, преимущественно для сушки крови. В последнем случае используют мелющие тела 12 – твердые шары для измельчения сухого остатка крови.

Перед сушкой включают вакуумный насос и частично заполняют теплоносителем тепловую рубашку. После включения циркуляционного насоса 23, способствующего перекачке теплоносителя из нижней полости рубашки и его разбрызгиванию в верхней части, включают ТЭН для подогрева теплоносителя. Происходит разогрев камеры до заданной температуры.

Продукт для сушки заливают в воронку 16. Под действием вакуума он засасывается в рабочую камеру и начинается процесс обезвоживания. Через час сушки от тепловой рубашки 9 и камеры 7 отключают все коммуникации, и включается привод электродвигателя 2, камера начинает вращаться со скоростью $5 \div 10$ об/мин, перемешивая шарами продукт. Через $5 \div 10$ мин двигатель выключают, снова подключают все коммуникации и сушка возобновляется. Такой цикл повторяется несколько раз до достижения заданной влажности продукта.

После того, как сушка заканчивается, отключают все коммуникации и включают двигатель 2, приводящий камеру во вращение. При этом шары измельчают высушенный продукт до состояния муки. Далее сбрасывают вакуум, открывают дверцу 11, вставляют в нее сито со сборником сухого продукта и включают двигатель, способствующий разгрузке продукта в сборник. По завершении данного процесса двигатель отключают, открывают дверцу 11 и вынимают сито с обезвоженным продуктом.

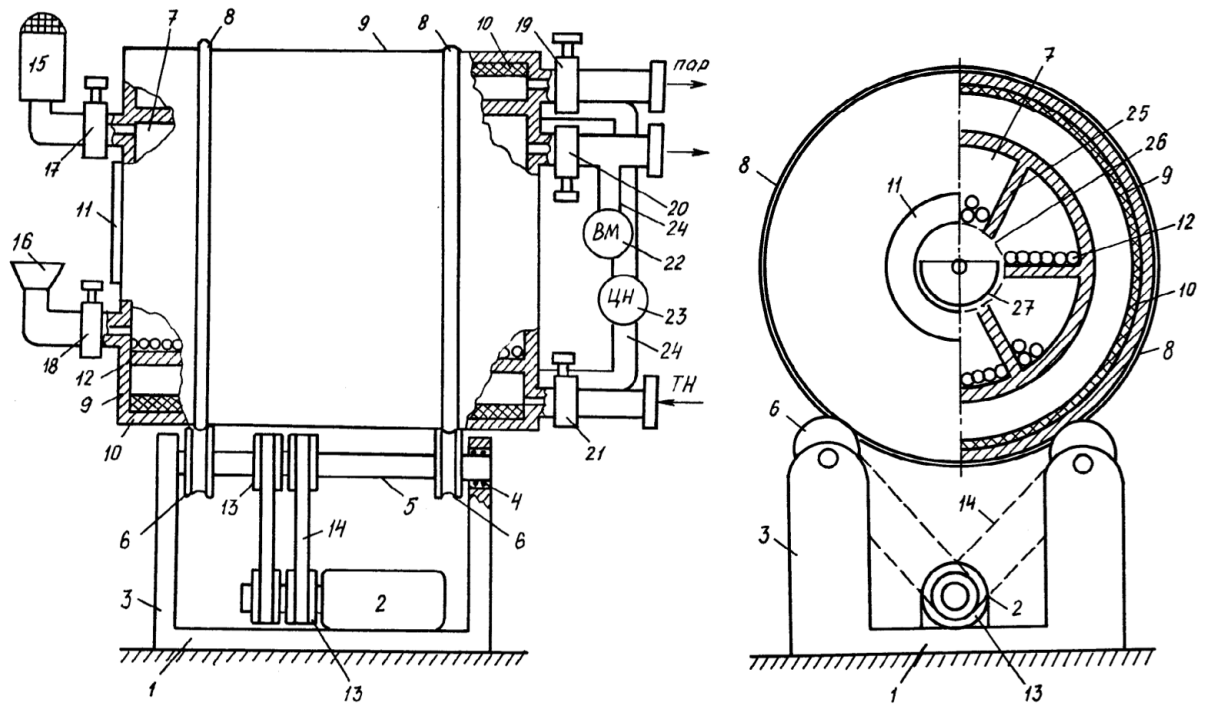


Рисунок 1.11 – Устройство вакуумной сушки жидких продуктов: 1 – станина; 2 – силовой двигатель; 3 – боковая станина; 4 – подшипник; 5 – вал; 6 – ролик опоры; 7 – вакуумная сушильная камера; 8 – кольцевая направляющая; 9 – тепловая рубашка; 10 – теплоизоляция рубашки; 11 – разгрузочная дверца; 12 – мелющие тела; 13 – блок привода; 14 – приводной ремень; 15 – воздушный фильтр; 16 – загрузочная воронка; 17÷21 – вентили; 22 – вакуумметр; 23 – циркуляционный насос; 24 – наружная труба; 25 – полка; 26 – цилиндрическое сито; 27 – сборник готового продукта

Различные продукты характеризуются своими оптимальными режимами сушки [21, 22]. Например, для сушки сыра в изобретении [89] предлагается измельчение продукта до толщины слоя $5\div 50$ мм, вакуумное обезвоживание при остаточном давлении $2\div 15$ кПа при температуре нагрева $30\div 70$ °С и плотности теплового потока 40 кВт/м². Испаряющаяся при этом влага от продукта оседает на конденсаторе холодильной машины с температурой поверхности $(-20\div -50)$ °С.

Известен также схожий способ вакуумной сушки [90], заключающийся в том, что продукт измельчают до толщины слоя от 5 до 70 мм и обезвоживают при остаточном давлении $2\div 3$ кПа при температуре $(70\div 80)$ °С и тепловой

нагрузке $9,0 \div 9,5$ кВт/м². Конденсацию испаряющейся влаги осуществляют в испарителе холодильной машины с температурой на поверхности ($-25 \div -30$)°С.

Вакуумную сушку творога рекомендуют проводить при толщине слоя продукта 15 мм, размещенного на поддоне в виде гранул, диаметром 5 мм при остаточном давлении $3 \div 4$ кПа путем нагрева инфракрасным излучением до температуры ($57 \div 63$)°С при тепловой нагрузке в $3,48 \div 3,88$ кВт/м² до достижения влажности творога в 4% [88].

В изобретении [91] вакуумную сушку ягод предлагают осуществлять двухступенчатым способом. Ягоды измельчают до толщины слоя $5 \div 10$ мм. Первый этап сушки подразумевает сушку при остаточном давлении $8 \div 12$ кПа и температуре ($60 \div 65$)°С. На втором этапе обезвоживания давление в камере понижают до $3 \div 4$ кПа, а температуру повышают до ($70 \div 80$)°С.

Вакуумная сушка может осуществляться в псевдооживленном состоянии [126]. Способ вакуумной сушки продуктов [85] предусматривает воздействие импульсного подвода теплоты от инфракрасной лампы для поддержания температуры сушки в ($30 \div 50$)°С. Остаточное давление при этом составляет $4 \div 8$ кПа, а слой продукта находится в псевдооживленном состоянии вследствие воздействия вибрирующей системы. Конденсация паров влаги осуществляется в конденсаторе, пропускающим через себя проточную холодную воду.

Для снижения энергозатрат вакуумной сушки используют различные способы подвода теплоты [29, 118, 56]. В работе [49] была исследована зависимость энергозатрат от способа подвода теплоты при сушке молочных продуктов. На рис. 1.12 представлены графики зависимости удельных затрат теплоты при ступенчатом и импульсном подводе теплоты от толщины слоя сушки.

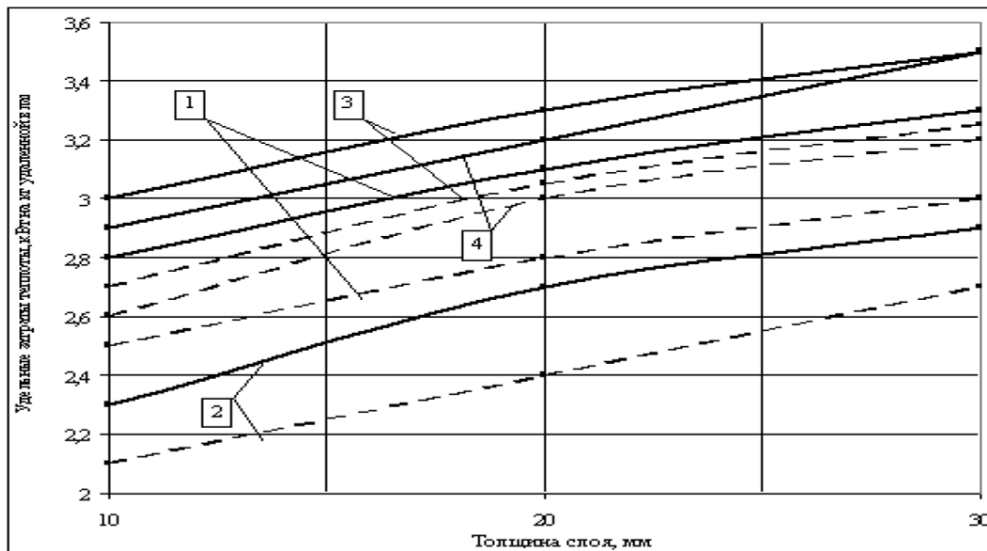


Рисунок 1.12 – Зависимость удельных затрат теплоты при ступенчатом (сплошные линии) и импульсном (пунктирные линии) подводе теплоты от толщины слоя продукта: 1 – мягкие сыры; 2 – твердые сыры; 3 – рассольные сыры; 4 – творог

При одинаковой толщине слоя сушки сыров и творога удельные затраты теплоты при импульсном энергоподводе ниже на $0,2 \div 0,3$ кВт/кг удаленной влаги, чем при ступенчатом способе подвода теплоты. Такое сокращение энергозатрат обусловлено уменьшением продолжительности обезвоживания при импульсном способе подвода теплоты, которое для мягких сыров было равно $12,5 \div 19,2\%$, для твердых сыров – $11,4 \div 22,7\%$, для рассольных сыров и творога – соответственно $13,3 \div 16,7\%$ и $16,7 \div 21,7\%$. Повышение скорости вакуумной сушки при импульсном подводе теплоты связано со снижением градиента температур внутренних и наружных слоев продукта в период, когда не происходит подвода теплоты от нагревательных элементов [49].

Вакуумная сушка может использоваться также в качестве предварительного этапа перед сублимационным обезвоживанием [139]. В этом случае удастся повысить эффективность процесса по различным критериям. В табл. 1.1 на примере яблочного пюре представлены данные по сравнению показателей вакуумной, сублимационной и совмещенной сушки, в которой одна половина

процесса обезвоживания осуществляется вакуумным способом, а другая – сублимационным [108].

Таблица 1.1 – Показатели сушки различными способами

| Способ сушки | Продолжительность сушки, час. | Удельные энергозатраты, кВт/кг удаленной влаги | Качество сухого продукта |
|----------------|-------------------------------|--|--------------------------|
| Вакуумный | 7 | 2,321 | Удовлетв. |
| Сублимационный | 11,5 | 2,678 | Отличное |
| Совмещенный | 8 | 2,446 | Очень хорошее |

Представленные данные свидетельствуют о том, что применение вакуумной сушки перед сублимационным обезвоживанием позволяет сократить удельные энергозатраты на 10÷15% и продолжительность процесса на 3,5 часа.

Таким образом, вакуумная сушка является сложным процессом с математической и физической точки зрения. Были рассмотрены основные процессы, происходящие при вакуумной сушке продуктов и установки, используемые для этих целей.

1.3. Теоретические основы нагрева и сушки инфракрасными лучами

Сушка инфракрасным излучением является одной из наиболее перспективных и прогрессивных технологий [57, 78]. Инфракрасная сушка получила широкое распространение в пищевой и других отраслях промышленности благодаря интенсификации процесса удаления влаги за счет значительной плотности теплового потока на поверхности продукта [13, 64].

Исследованиям в области использования инфракрасного излучения в технологиях сушки посвящено много работ. Выбор эффективных режимов инфракрасной сушки во многом зависит не только от оптических и теплофи-

зических характеристик объекта исследования, но и от его физико-химического состава и биологических характеристик [35].

В процессе нагрева продукта ИК-излучением лучистая энергия преобразуется в теплоту, при этом процессы тепло- и массопереноса наблюдаются как внутри продукта, так и вне материала в камере. При проектировании систем ИК-сушки и расчете требуемой энергии излучения необходимо учитывать такие факторы как пропускающая и поглощательная способность материала, коэффициенты поглощения и рассеивания, а также селективное отражение, что в свою очередь требует знаний о спектральных характеристиках продукта [1]. При этом стоит отметить, что поскольку в процессе сушки из-за уменьшения содержания влаги отражательная способность материала уменьшается, то по мнению ряда авторов [35] целесообразным является изменение температуры продукта по мере удаления влаги [3].

На процесс инфракрасной сушки большое влияние оказывает длина волны излучения. В некоторых работах утверждается, что наибольшая эффективность обезвоживания наблюдается при длине волны $\lambda=1$ мкм [31]. По литературным данным энергия кванта инфракрасного излучения указанной длины волны является достаточной для отрыва молекул влаги от материала и интенсификации ее массопереноса, но недостаточной для разрыва химических связей, которые влияют на биохимический состав, а следовательно и на степень сохранности нативных характеристик обезвоженного продукта [133].

В качестве источников инфракрасного излучения в промышленности используют раскаленные твердые тела, изготавливаемые, как правило, из керамики, тугоплавких металлов и сплавов и способные выдерживать температуры до 3000°C [135, 150, 77, 62]. Температура излучателя обуславливает как плотность теплового потока энергии излучения, так и распределение данной энергии по спектру [41]. При низких температурах ИК-излучателей общий уровень плотности потока излучения также невысокий, а максимум энергии приходится на диапазон больших длин волн. Таким образом, изме-

няя температуру излучателя можно смещать максимум энергии излучения ту или иную область спектра [33, 102].

По длине волны инфракрасное излучение делится на 3 группы: коротковолновое излучение ($\lambda = 0,74 \div 2,5$ мкм), средневолновое ($\lambda = 2,5 \div 50$ мкм) и длинноволновое излучение ($\lambda = 50 \div 2000$ мкм). В международной организации по стандартизации (ISO 20473) используется также деление ИК-спектра на 3 группы:

- NIR (ближний ИК-диапазон), длина волны $\lambda = 0,78 \div 3$ мкм;
- MIR (средний ИК-диапазон), длина волны $\lambda = 3 \div 50$ мкм;
- FIR (дальний ИК-диапазон), длина волны $\lambda = 50 \div 1000$ мкм.

В технике ИК-сушки по длине волны температурные излучатели делятся на 2 типа: коротковолновые (светлые излучатели) и длинноволновые (темные излучатели), использующие максимум энергии излучения соответственно в зонах NIR и FIR [117].

В табл. 1.2 представлена более подробная классификация деления ИК-диапазона в технике сушки [128].

В данной классификации ИК-волны среднего диапазона также делятся на 3 группы: SWIR, MWIR и LWIR. Наибольшее поглощение водой электромагнитных волн наблюдается в диапазоне NIR и SWIR при длине волны $0,75 \div 3$ мкм.

Таблица 1.2 – Стандартная схема деления длин волны ИК-диапазона

| Аббревиатура | Длина волны, мкм | Энергия фотонов, мэВ |
|--------------|------------------|----------------------|
| NIR | 0,75÷1,4 | 900÷1700 |
| SWIR | 1,4÷3 | 400÷900 |
| MWIR | 3÷8 | 150÷400 |
| LWIR | 8÷15 | 80÷150 |
| FIR: | 15÷1000 | 1,2÷80 |

Светлые излучатели представлены в основном генераторами с кварцевыми трубками и зеркальными лампами накаливания. К темным излучателям

относят элементы сопротивления. С целью разработки энергоэффективных ИК-излучателей используют различные методы, например, нанесение функциональной керамической оболочки на линейный кварцевый ИК-излучатель. Исследования показывают, что такой способ позволяет сократить энергопотребление в десятки раз по сравнению с обычным ИК-излучателем без покрытия [34, 41].

Как уже было отмечено ранее, использование инфракрасного излучения дает возможность несколько снизить температуру сушки и повысить таким образом степень сохранности полезных веществ высушиваемого продукта. При этом широко используется ИК-сушка в условиях вакуума. Для сравнения на рис. 1.13 изображены графики обезвоживания различных продуктов вакуумной инфракрасной и пароконвективной сушкой [101].

Таким образом, продолжительность сушки до достижения заданной влажности при вакуумной инфракрасной и пароконвективной сушке практически одинаковое, но при этом температура вакуумной ИК-сушки на 20°C меньше, чем при пароконвективной, что безусловно способствует лучшему сохранению термолабильных компонентов сырья [101].

Что касается степени сохранности биологически-ценных веществ, то в одной из работ [51] проводилось сравнение содержания витамина С в процессе хранения свежих яблок и яблок, высушенных инфракрасным способом. В табл. табл. 1.3 представлены соответствующие результаты [51].

Было установлено, что концентрация витамина С на 100 г продукта повышается пропорционально снижению относительной массы сырья по мере обезвоживания. При хранении сырых и высушенных яблок витамин С разрушался вследствие воздействия окружающей среды, при этом в яблоках, обезвоженных ИК-сушкой, потери витамина С в 4÷4,5 раза меньше. В этой же работе было доказано, что инфракрасная сушка по сравнению с конвективной сокращает время обезвоживания на (34÷44)% и снижает энергозатраты на (20÷25)% [51].

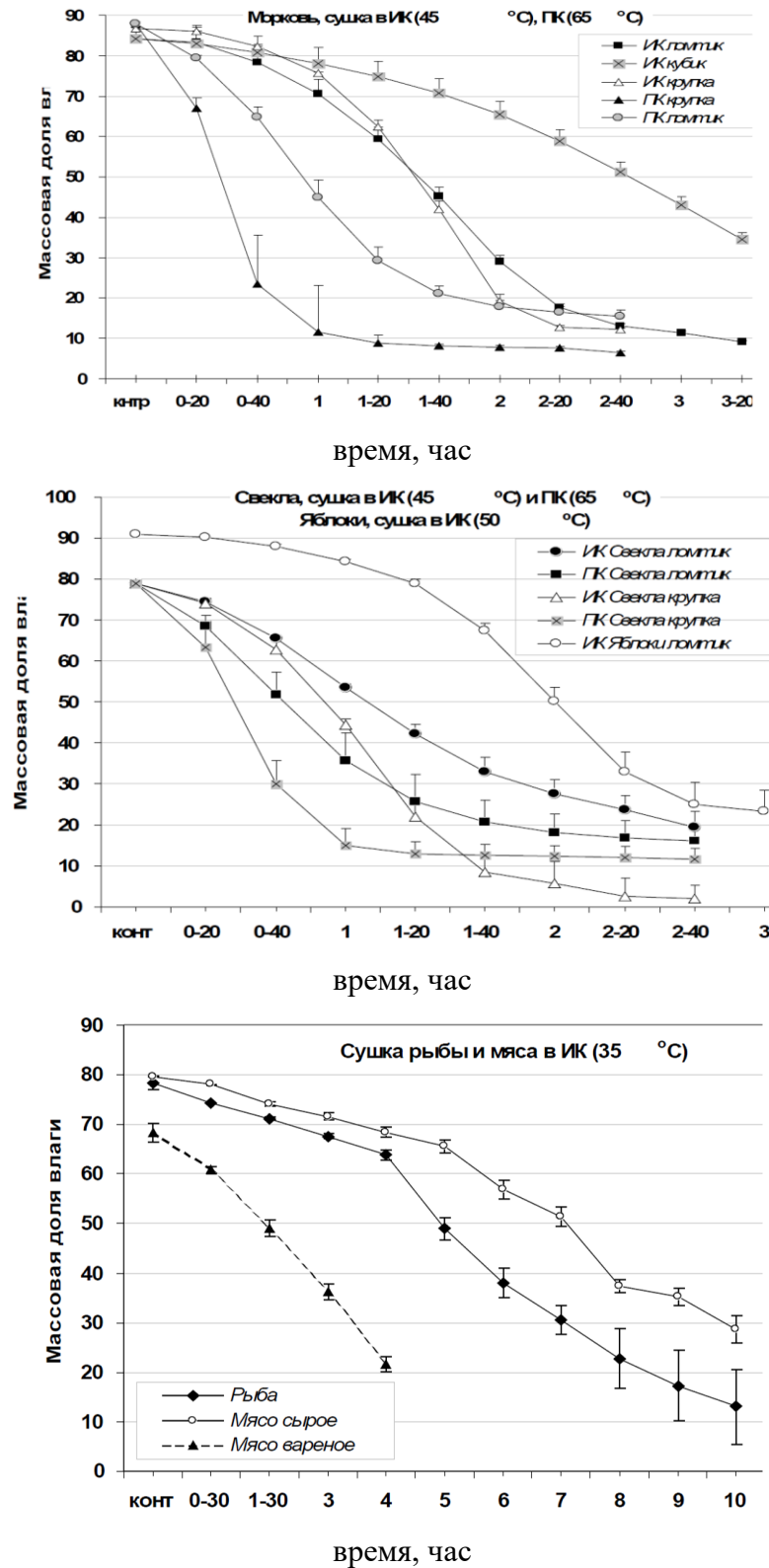


Рисунок 1.13 – Графики сравнения ИК-сушки и пароконвективной сушки пищевых продуктов

Таблица 1.3 - Содержание витамина С в яблоках в процессе хранения

| Продукт | Срок хранения, мес. | Содержание витамина С, мг/100 г | Потери витамина С, % |
|----------------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------|
| Яблоки | 0 | 14,2±0,71 | 0 |
| | 3 | 5,4±0,27 | 62,0±1,1 |
| | 6 | 0 | 100±1,7 |
| Яблоки инфра-красной сушки | 0 | 27,8±1,11 | 0 |
| | 3 | 24,7±0,97 | 11,2±0,2 |
| | 6 | 18,5±0,92 | 25,1±0,5 |

Достаточно большое количество работ посвящено математическому описанию процессов сушки при ИК-энергоподводе [7, 6, 110, 130, 141, 143, 145]. Для моделирования процессов теплообмена при инфракрасной сушке необходимо учитывать, что в данном случае имеет место не только перенос теплоты от ИК-излучателя, но также от поверхности, на которой находится продукт [11, 30, 54, 95, 114]. Таким образом, реализуется лучисто-кондуктивный теплообмен. Математическое моделирование данного процесса при одном, двух и трех точечных источниках ИК-излучения проводилось в одной из работ [52]. В ней предлагается использование закона Ламберта, в соответствии с которым величина потока излучения можно определить как произведение энергии излучения на угловой коэффициент, рассчитываемый по формуле [52, 55]:

$$dF = \frac{\cos \varphi}{2} d\varphi, \quad (1.10)$$

где φ - угол между нормалью от источника к плоскости и вектором излучения; $d\varphi$ - приращение угла φ .

Величину $\cos \varphi$ в формуле (10) можно найти по следующей формуле [52]:

$$\cos \varphi_i = \cos \varphi_{1_i} + \cos \varphi_{2_i}, \quad (1.11)$$

Значения $\cos \varphi_{1_i}$ и $\cos \varphi_{2_i}$ определяются следующим образом [52]:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{1_i} &= \frac{H}{\sqrt{H^2 + (Xc1 - dA \cdot i)^2}}, \\ \cos \varphi_{2_i} &= \frac{H}{\sqrt{H^2 + (Xc2 - dA \cdot i)^2}}, \end{aligned} \quad (1.12)$$

где $Xc1 = a - \frac{B}{2}$, $Xc2 = a + \frac{B}{2}$, $dA = \frac{A}{n}$, $i=0 \dots 2 \cdot n$; A – полуширина поверхности, м; H – высота размещения источника над поверхностью, м; n – число

участков разбивки полуширины поверхности.

Авторами работы [50] методом анализа было получено критериальное уравнение вакуумной ИК-сушки продукта во вспененном состоянии:

$$\frac{dc}{d\tau} = aE^x h^y \lambda^z P^k \left(\frac{\rho}{\beta} \right)^l c_n m c^n, \quad (1.13)$$

где a, x, y, z, k, l, m, n – безразмерные эмпирические коэффициенты; E – плотность теплового потока, Вт/м²; h – условная толщина слоя, м; λ – длина волны излучения, м; P – давление окружающей среды, Па; ρ – истинная плотность продукта, кг/м³; β – кратность пены, м³/м³; c_n – начальная концентрация, кг/кг; c – текущая концентрация, кг/кг.

В другой работе, также посвященной математическому моделированию процессов инфракрасной сушки продукта во вспененном состоянии использовалось уравнение переноса тепла при объемном энергоподводе в случае одномерной задачи [46]:

$$c\rho(x, t, w) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(w, x, t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \xi \cdot r(w, x, t) \rho(w, x, t) \frac{\partial w}{\partial \tau} + \omega(w, x), \quad (1.14)$$

где $c\rho(x, t, w)$, $\lambda(w, x, t)$, $\rho(w, x, t)$ – функции теплофизических характеристик; $\omega(w, x)$ – функция распределения объемной плотности поглощенной энергии излучения по глубине оптически тонкого слоя; $r(w, x, t)$ – теплота испарения, определенная при термодинамическом анализе механизма внутреннего массопереноса; x – координата толщины слоя (изменяется от 0 до d); ξ – коэффициент фазовых превращений.

Осуществив соответствующие преобразования получили уравнение следующего вида:

$$\frac{\partial t}{\partial w} = \frac{a}{\partial w \partial \tau} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r \cdot \rho}{c\rho} + \frac{\omega}{\partial w \partial \tau \cdot c\rho}, \quad (1.15)$$

где a - коэффициент температуропроводности.

Далее с применением граничных условий (16) было получено дифференциальное уравнение параболического типа (17).

$$E_{n.гран.} = E_p \frac{l - R_\infty(w)}{l - R_9(w) \cdot \psi^2(w, x=0)} \left[l + \frac{R_9(w) \cdot \psi^2(w, x=0)}{R_\infty(w)} \right], \quad (1.16)$$

где $E_{n.гран.}$ – падающий тепловой поток, Вт/м²; E_p – плотность падающего потока, Вт/м²; x – координата глубины слоя, м; l – толщина слоя, м; $R_\infty(w)$ – отражательная способность слоя бесконечной оптической толщины; $R_9(w)$ – показатель эффективной отражательной способности.

$$\frac{\partial T}{\partial C} = \frac{a}{\left(\frac{\partial C}{\partial \tau} \right)} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{r \cdot \rho}{c\rho} + \frac{\omega}{\left(\frac{\partial C}{\partial \tau} \right) \cdot c\rho}, \quad (1.17)$$

где C - концентрация сухих веществ.

Таким образом, были рассмотрены теоретические основы сушки продуктов инфракрасным излучением. Использование ИК-сушки и вакуума позволяет снизить температуру нагрева и исключить негативное влияние температуры на нативные свойства сырья [19]. Продукты, высушенные данным методом в процессе хранения в лучшей степени сохраняют ценные компоненты, например, витамины. Математическое моделирование данного явления представляет собой многомерную задачу, для решения которой необходимы конкретные условия проведения процесса (форма и свойства тела, количество источников излучения и т.д.).

1.4 Анализ свойств полутвердых сыров как объектов сушки

Сыры представляют собой один из самых биологически ценных пищевых продуктов, содержащих высокоусвояемые соединения белкового и небелкового азота, незаменимые аминокислоты, комплекс жиров, водорастворимые витамины и т.д. [14, 96, 61, 146] Среди всех сыров полутвердые сыры занимают особое место. Отличительная особенность выработки данных сыров состоит в том, что их производят по технологии твердых сыров, но без этапа принудительного прессования (полутвердые сыры самопрессуются) [71, 125, 107]. При этом их созревание происходит также как при производстве мягких сыров с участием ферментов молочнокислых бактерий и микрофлоры сырной слизи [40]. По вкусовым свойствам полутвердые сыры отличаются острым, слегка аммиачным вкусом и запахом, обусловленным наличием сырной слизи, культивируемой на поверхности головок [80, 97, 39, 66].

В табл. 1.4 представлены физико-химические показатели некоторых полутвердых сыров [72].

Представленные сыры характеризуются одинаковым содержанием жира в сухом веществе – 45% и схожим содержанием влаги – (42,2÷44,0)%. Из

данных сыров наибольшим сроком созревания в 60 сут. обладал сыр Голландский. Активная кислотность сыров составляет порядка 5,4.

Таблица 1.4 – Физико-химические показатели полутвердых сыров

| Показатель | Голландский | Костромской | Белебеевский-экстра |
|--------------------------|-------------|-------------|---------------------|
| Массовая доля, %: влаги | 43,2±0,5 | 44,0±0,5 | 42,2±0,3 |
| жира в сухом веществе | 45 | 45 | 45 |
| Активная кислотность, рН | 5,4 | 5,3 | 5,5 |
| Срок созревания, сут. | 60 | 30 | 45 |

Органолептические показатели вышеуказанных сыров приведены в табл. 1.5 [72].

Таблица 1.5 – Органолептические показатели полутвердых сыров

| Показатель | Голландский, Костромской | Белебеевский-экстра |
|--------------|--|---|
| Вкус и запах | Умеренно выраженный сырный, кисловатый, допускается легкая пряность | Выраженный сырный, сладковато-пряный, с ореховым привкусом |
| Консистенция | Тесто нежное, пластичное, однородное | Тесто нежное, пластичное, однородное по всей массе |
| Рисунок | На разрезе сыр имеет рисунок, состоящий из глазков круглой или овальной формы, расположенных по всей массе | На разрезе сыр имеет рисунок круглой или овальной формы, равномерно расположенных по всей массе |
| Цвет теста | От слабо-желтого до желтого, однородный по всей массе | От бледно-желтого до светло-желтого, равномерный |

Анализ данных в табл. 1.5 свидетельствует о том, что сыры Голландский и Костромской по органолептическим показателям соответствуют нормативным показателям для сыров данной группы. Что касается сыра Белебеевский-

экстра, то он является новым разработанным продуктом и его органолептические характеристики соответствуют технической документации производителя [72].

В табл. 1.6 приведен химический состав других полутвердых сыров [112].

Из всех видов сыров представленные полутвердые сыры в табл. 1.6 обладают достаточно невысоким содержанием золы – 4,0÷4,4 %. Концентрация жиров в этих сырах тоже относительно небольшое – 9,0 % и 14,7 % у сыра Прибалтийский и Литовский соответственно. Полутвердые сыры являются также наименее калорийными – энергетическая ценность представленных сыров лежит в пределах 207÷250 ккал.

Таблица 1.6 – Химический состав полутвердых сыров

| Показатель | Прибалтийский | Литовский |
|-------------------------------|---------------|-----------|
| Вода, % | 55,0 | 51,0 |
| Белки, % | 29,8 | 27,9 |
| Жиры, % | 9,0 | 14,7 |
| Насыщенные жирные кислоты, % | 5,2 | 7,7 |
| Холестерин, мг% | 27,0 | 44,0 |
| Органические кислоты, % | 2,2 | 2,0 |
| Зола, % | 4,0 | 4,4 |
| Энергетическая ценность, ккал | 207,0 | 250,0 |

Сыры характеризуются также достаточно широким спектром минеральных веществ. Микроэлементный состав полутвердых сыров отображен в табл. 1.7 [112].

Из всех представленных микроэлементов наибольшей концентрацией обладал кальций – его содержание в сырах составляло 1000÷1080 мг%. Высоким содержанием в сырах характеризовались также натрий (930÷960 мг%) и фосфор (780 мг%). В полутвердых сырах присутствуют также такие элементы как калий, магний и железо.

Таблица 1.7 – Микроэлементный состав полутвердых сыров, мг%

| Наименование элемента | Прибалтийский | Литовский |
|-----------------------|---------------|-----------|
| Натрий | 960 | 930 |
| Калий | 80 | 90 |
| Кальций | 1080 | 1000 |
| Магний | 50 | 50 |
| Фосфор | 780 | 780 |
| Железо | 0,9 | 0,8 |

Витаминный состав полутвердых сыров приведен в табл. 1.8 [112].

Таблица 1.8 – Витаминный состав полутвердых сыров

| Наименование элемента | Прибалтийский | Литовский |
|------------------------------|---------------|-----------|
| Витамин А, мкг% | 100 | 170 |
| β -каротин, мкг% | 50 | 100 |
| Ретиноловый эквивалент, мкг% | 108 | 187 |
| Токоферолэквивалент, мг% | 0,2 | 0,3 |
| Витамин В ₁ , мг% | 0,02 | 0,04 |
| Витамин В ₂ , мг% | 0,44 | 0,35 |
| Витамин РР, мг% | 0,4 | 0,4 |
| Ниациновый эквивалент, мг% | 8,0 | 7,8 |
| Аскорбиновая кислота, мг% | 0,9 | 0,7 |

В полутвердых сырах присутствуют витамины группы А, С, В₁, В₂, РР. Наибольшее содержание наблюдается у аскорбиновой кислоты – 0,9 и 0,7 мг% у сыров Прибалтийский и Литовский соответственно. Также в сырах имеются такие вещества как β -каротин, ретиноловый эквивалент, токоферол-эквивалент и др. (табл. 1.8).

Таким образом, был рассмотрен химический состав и органолептические свойства полутвердых сыров. Показана высокая биологическая ценность

данных продуктов. Большие перспективы показывает возможность обезвоживания данных сыров для добавления в различные продукты питания.

1.5. Заключение по литературному обзору, цели и задачи исследования

Представленный обзор отечественной и зарубежной литературы позволил сделать следующие выводы:

1. Обезвоживание пищевых продуктов сопровождается значительными изменениями его органолептических, физико-химических, микробиологических и других характеристик. Для капиллярно-пористых материалов наблюдается равномерная усадка на протяжении всего процесса сушки. Сушка продуктов с относительно высокой влажностью воздуха (более 0,7) сопровождается образованием пор. При обезвоживании наблюдаются также концентрация сухих веществ на поверхности наружных слоев. Сушка сопровождается целым рядом биохимических трансформаций, вызывающих изменение химического состава и органолептических показателей продукта. В случаях высоких температур нагрева может появляться изменение цвета, побурение, подгорание, образование твердой корочки на поверхностных слоях продукта, потери вкуса и характерного запаха, снижение регидратирующей способности и др.

2. На микроструктуру обезвоженного продукта большое влияние оказывают режимы сушки, влияющие на характер протекания процесса удаления влаги. С повышением температуры сушки размер микропор уменьшается, при этом повышается коэффициент растяжения клеток. Наилучшая структура сохранялась при сублимационной сушке, она формирует скелетообразную и более пористую форму по сравнению с остальными способами сушки.

3. В вакуумной сушке за счет пониженного давления среды удастся интенсифицировать процесс сушки и избежать многих недостатков традиционной атмосферной сушки. Продукты вакуумной сушки характеризуются рядом преимуществ по органолептическим показателям, возможности гранули-

рования, относительной невысокой себестоимости выработки продукта и оборудования. Для интенсификации испарения влаги, фильтрационного переноса пара и жидкости в продукте при вакуумной сушке используют чередование циклов вакуумирования и нагрева продукта, сушку в псевдооживленном состоянии, сушку в тонком слое. Эффективность вакуумной сушки можно повысить, используя двухступенчатый способ обезвоживания.

4. Для снижения энергозатрат вакуумной сушки используют различные способы подвода теплоты, например импульсное воздействие источника тепла. На примере сушки сыров и творога: удельные затраты теплоты при импульсном энергоподводе ниже на $0,2 \div 0,3$ кВт/кг удаленной влаги, чем при ступенчатом способе подвода теплоты. Вакуумная сушка может использоваться также в качестве предварительного этапа перед сублимационным обезвоживанием, что позволяет также сократить удельные энергозатраты на $10 \div 15\%$ и продолжительность процесса на 3,5 часа.

5. Сушка инфракрасным излучением является одной из наиболее перспективных и прогрессивных технологий. Использование инфракрасного излучения дает возможность несколько снизить температуру сушки и повысить таким образом степень сохранности полезных веществ высушиваемого продукта. Выбор эффективных режимов инфракрасной сушки во многом зависит не только от оптических и теплофизических характеристик объекта исследования, но и от его физико-химического состава и биологических характеристик. Наибольшее поглощение водой электромагнитных волны наблюдается в диапазоне NIR и SWIR при длине волны $0,75 \div 3$ мкм. Продукты, высушенные инфракрасным методом, в процессе хранения в лучшей степени сохраняют ценные компоненты, например, витамины.

6. Сыры, в том числе полутвердые, представляют собой один из самых биологически ценных пищевых продуктов, содержащих высокоусвояемые соединения белкового и небелкового азота, незаменимые аминокислоты, комплекс жиров и другие полезные вещества. Полутвердые сыры различных производителей могут значительно отличаться по содержанию жиров. По-

лутвердые сыры обладают достаточно невысоким содержанием золы – 4,0÷4,4 %. Из всех сыров полутвердые сыры являются также наименее калорийными. По минеральному составу в полутвердых сырах преобладают такие микроэлементы как кальций, натрий и фосфор. В полутвердых сырах присутствуют также витамины группы А, С, В₁, В₂, РР.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка технологии вакуумно-инфракрасной сушки полутвердых сыров с модернизированным способом подвода теплоты. Для решения данной цели были определены следующие задачи:

- исследование формы влаги в зрелых полутвердых сырах;
- разработка технологических режимов вакуумной сушки полутвердых сыров;
- анализ качественных показателей сухих полутвердых сыров и эффективности сушки в зависимости от способа подвода теплоты;
- анализ микроструктуры сухих полутвердых сыров;
- исследование сорбционных свойств полутвердых сыров в процессе хранения;
- разработка технологии вакуумной сушки полутвердых сыров;
- расчет и оценка экономической эффективности разработанной технологии вакуумной сушки полутвердых сыров.

ГЛАВА 2. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Схема проведения экспериментальных исследований

Весь цикл экспериментальных исследований состоял из нескольких последовательных взаимосвязанных этапов, общая схема которых изображена на рис. 2.1.

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

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.



Рисунок 2.1 – Схема проведения экспериментальных исследований

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

2.2. Методы и объекты исследований

Объектами исследований выступали полутвердые сыры следующих марок: «Голландский», «Костромской» и «Пошехонский».

При проведении исследований использовали как стандартные общепринятые, так и оригинальные методики определения физико-химических, органолептических и других свойств объектов исследований.

Отбор проб и их подготовку к анализу осуществляли в соответствии ГОСТ 9225-84 и ГОСТ 26809-86.

Формы связи влаги в продукте определяли методом неизотермического анализа на дериватографе.

Органолептическую оценку проводили по 40-бальной шкале по анализу четырех показателей:

- вкус (10-бальная шкала);
- цвет (10-бальная шкала);
- форма и консистенция (10-бальная шкала);
- запах (10-бальная шкала).

Критерии оценки представлены в табл. 2.1.

Содержание влаги в сырах определяли с помощью ускоренного метода на приборе Чижовой, путем высушивания навески образца по ГОСТ 3626-73 и ГОСТ Р 51464-99.

Содержание жира в сырах определяли кислотным методом Гербера по ГОСТ 5867-90. Метод заключается в выделении жира из молока и молочных продуктов за счет действия концентрированной серной кислоты и изоамилового спирта и последующем центрифугированием и измерением объема выделившегося жира в градуированной части жиросмера.

Таблица 2.1 – Методика органолептической оценки сухих сыров

| Наименование показателя | Характеристика | Количество баллов |
|-------------------------|---|-------------------|
| Вкус | Ярко выраженный сырный | 9-10 |
| | Слабовыраженный | 6-8 |
| | Кислый | 3-5 |
| | Горький | 1-2 |
| Цвет | Равномерный по всему объему от светло-желтого до желтого | 8-10 |
| | От светло-желтого до желтого с незначительными отклонениями по всему объему | 5-7 |
| | Неравномерный по всему объему со значительным отклонением в цвете | 1-4 |
| Форма и консистенция | Однородная в виде легко рассыпающихся частиц одинакового размера | 9-10 |
| | Неоднородная в виде рассыпающихся частиц разного размера | 6-8 |
| | Наличие слипшейся массы | 3-5 |
| | Наличие заметного количества пригорелых частиц | 1-2 |
| Запах | Типичный, хорошо выраженный сырный | 9-10 |
| | Слабовыраженный сырный | 6-8 |
| | Слегка затхлый | 3-5 |
| | Затхлый, наличие посторонних запахов | 1-2 |

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 Лэмбли. Просмотр и фотографирование гелей проводили на УФ-трансиллюминаторе ТСП-20М (Vilber Lourmat, США) при длине волны излучения 312 нм. Сохранение и обработку данных осуществляли с помощью гель-документирующей системы Doc-It LS (версия 6).

Микроструктурные исследования сыров до и после сушки осуществляли в Институте угля и углехимии СО РАН (г. Кемерово). Электронно-микроскопические исследования осуществляли на растровом сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6390 LA.

Анализ аминокислотного состава осуществляли с помощью ионообменной хроматографии на аминокислотном анализаторе ARACUS.

Изотермы сорбции получали путем выдержки сыров в эксикаторах с концентрациями серной кислоты, обеспечивающими относительную влажность воздуха от 10 до 100%. Навеску пробы взвешивали через каждые 24 часа до тех пор, пока его вес не станет постоянным.

2.3. Описание экспериментальной установки

Для проведения исследований по вакуумной сушке полутвердых сыров использовалась установка, схема и строение рабочей камеры которой представлены соответственно на рис. 2.2 и 2.3.

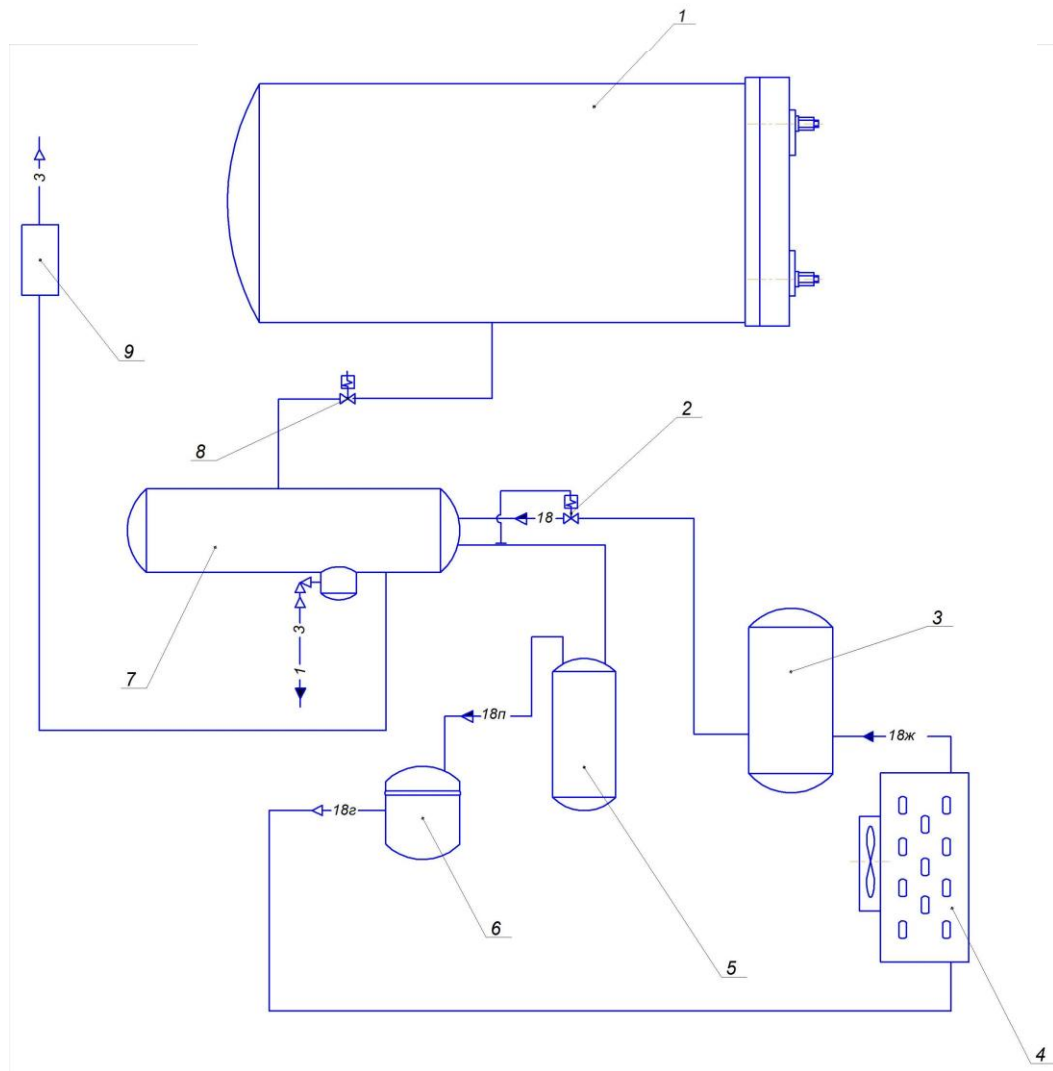


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема установки для вакуумной сушки:

- 1 – вакуумная камера; 2 – терморегулирующий вентиль;
 3 – ресивер; 4 – конденсатор; 5 – отделитель жидкости; 6 – компрессор;
 7 - десублиматор; 8 – запорный вентиль; 9 – вакуумный насос

Продукт укладывается в специальный сушильный поддон, который затем устанавливается внутри сушильной камеры на датчик, регистрирующий изменение массы. Далее закрывают крышку и включают вакуум-насосы. При

этом давление в камере понижается до установленного значения. После выхода установки на режим по остаточному давлению включаются сушильные лампы, которые нагревают продукт до установленной температуры.

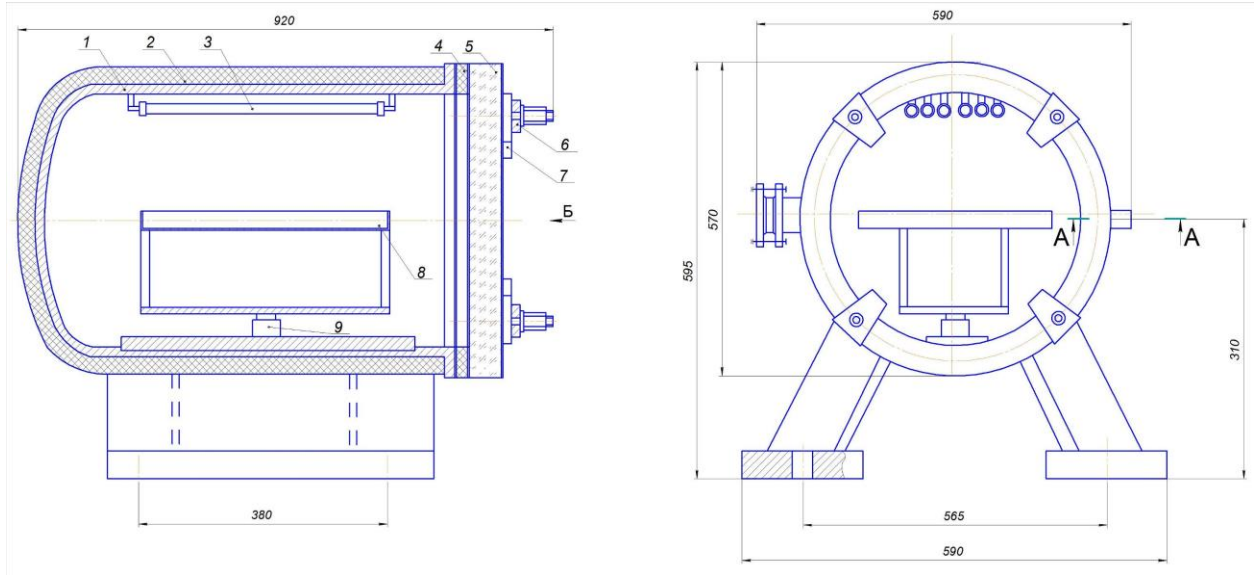


Рисунок 2.2 - Устройство рабочей камеры вакуумной сушильной установки:

- 1 – корпус; 2 – теплоизоляция камеры; 3 – инфракрасные лампы;
- 4 – резиновое уплотнение; 5 – оргстекло; 6 – поджимное кольцо;
- 7 – поджимная пластина; 8 – поддон; 9 - тензодатчик

Для нагрева продукта в камере предусмотрено шесть ламп: по две лампы с определенной длиной волны. Благодаря этому имеется возможность переключать лампы в нужный момент и изменять длину волны излучения, реализуя тем самым ступенчатую сушку. Когда температура продукта достигает установленного значения, интенсивность излучения ламп снижается для поддержания заданной температуры. Расстояние между лампами и лотком с продуктом составляет 20 см. Данную величину можно регулировать. Стоит отметить, что инфракрасные сушильные лампы обладают малой инерционностью и, как уже было сказано, позволяют регулировать мощность излучения.

Камера сушки соединена с десублиматором, в котором размещен змеевик испарителя холодильной машины. Сам десублиматор размещен ниже

сушильной камеры. Влажный воздух из камеры сушки направляется в десублиматор, где осуществляется вымораживание влаги из него на поверхности испарителя, выполненного в виде змеевика. После завершения процесса сушки открывают вентиль, расположенный в нижней части десублиматора и происходит оттаивание намерзшей влаги и ее последующее удаление из установки.

Холодильная машина включает в себя следующие элементы: испаритель, конденсатор, компрессор, ТРВ, отделитель жидкости, ресивер, а также приборы контроля режимов работы и автоматики.

Режимы сушки задаются в специальной программе, которая получает сигналы от измерительных датчиков, регистрирует их в виде графиков и через АЦП передает управляющие сигналы на приборы автоматики, контролирующие работу вакуумного насоса и инфракрасных ламп.

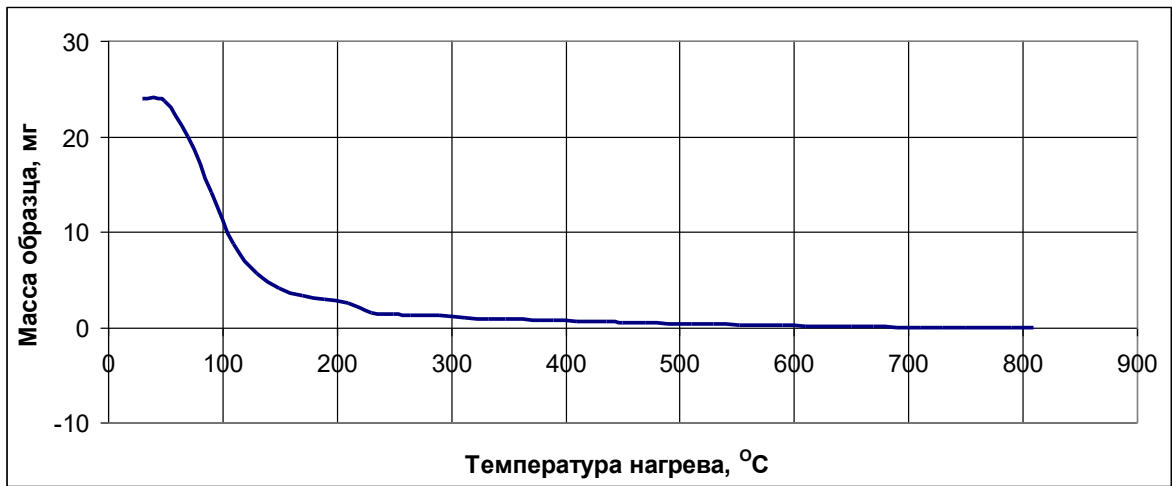
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАКУМНОЙ СУШКИ ПОЛУТВЕРДЫХ СЫРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ

3.1. Формы связи влаги в сырах

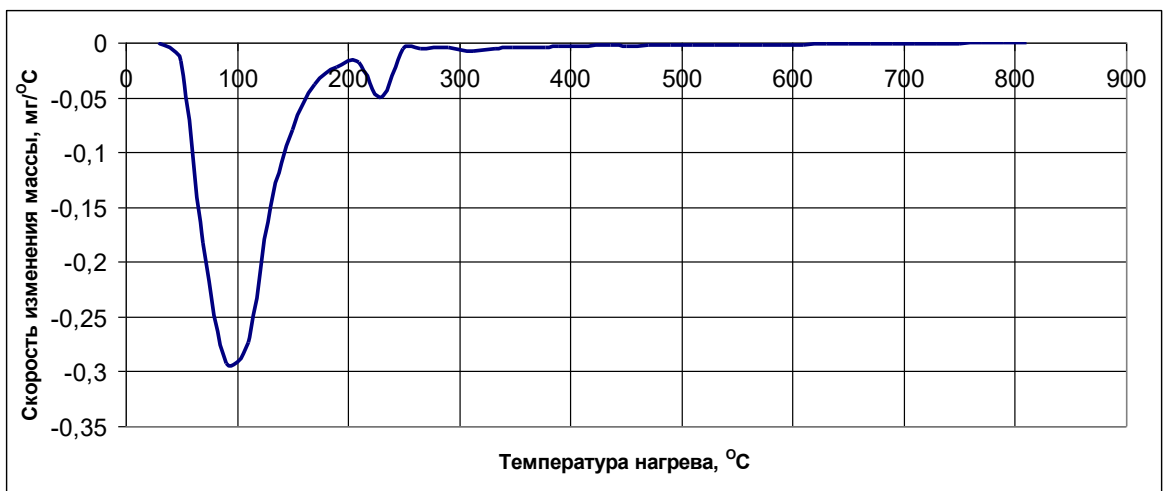
При правильно подобранных режимах сушки обеспечиваются высокие органолептические свойства и пищевая ценность обезвоженного продукта. Температурное воздействие на молочные продукты, в том числе сыры, обуславливает целый комплекс изменений в физико-химическом составе, микроструктуре и биологической ценности. Все это стоит принимать во внимание при выборе технологических режимов обработки сыров [1]. Ввиду вышесказанного важным аспектом становится информация о формах связи влаги в сырах с учетом молекулярной структуры воды. Она может быть получена путем анализа изменения характеристик воды при взаимодействии с сухими веществами. Для разработки эффективных технологий производства сыров необходимо знать о характере связи влаги в них на заданных температурных диапазонах, в которых происходит преобразование компонентов продукта.

Метод дифференциально-термического анализа может с успехом использоваться для исследования кинетики процесса термолиза пищевого сырья. Такие задачи, как оценка реакционной способности и установление кинетических характеристик могут быть с успехом решены за счет построения соответствующих моделей, отражающих особенности процесса обезвоживания капиллярно-пористых тел, к которым относятся сыры [3].

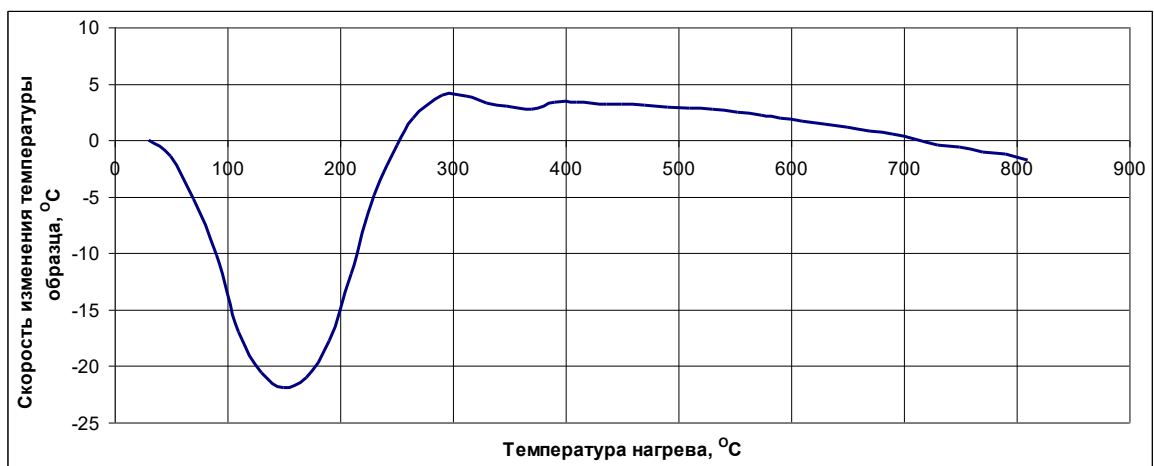
Опыты по исследованию форм связи влаги в полутвердых сырах проводились с использованием неизотермического анализа на дериватографе. В ходе нагрева навески исследуемых образцов определялось изменение массы, скорости изменения массы и скорости изменения температуры продукта, полученные методом термогравиметрии. Соответствующие графики представлены на рис. 3.1-3.3. [20]



а

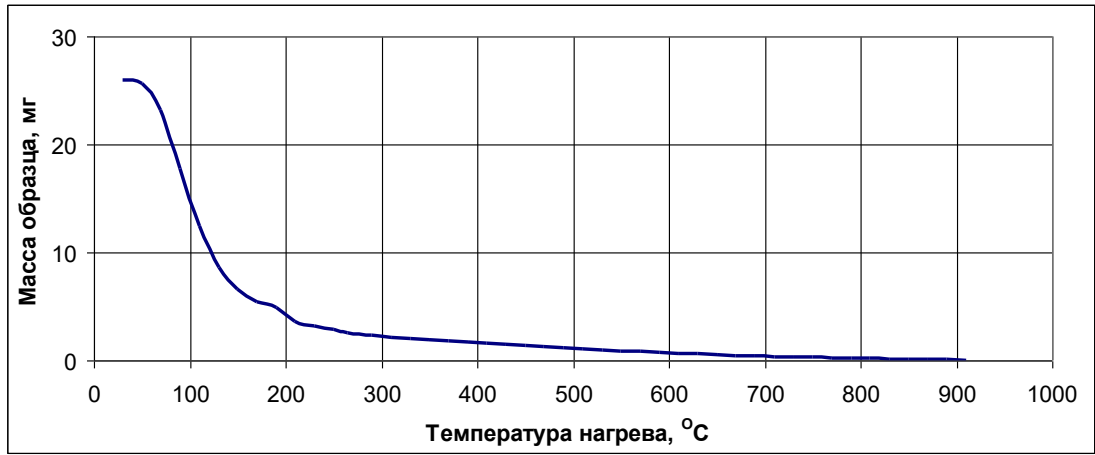


б

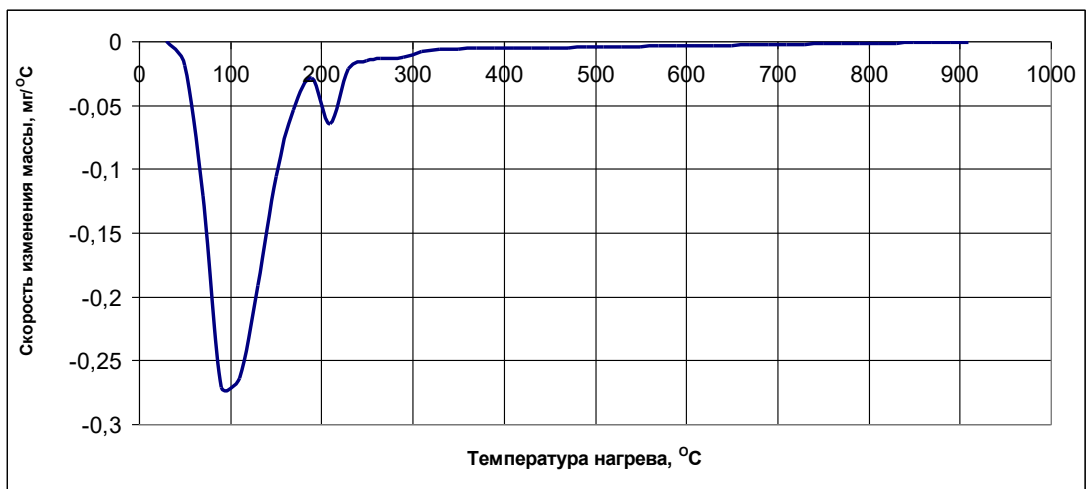


в

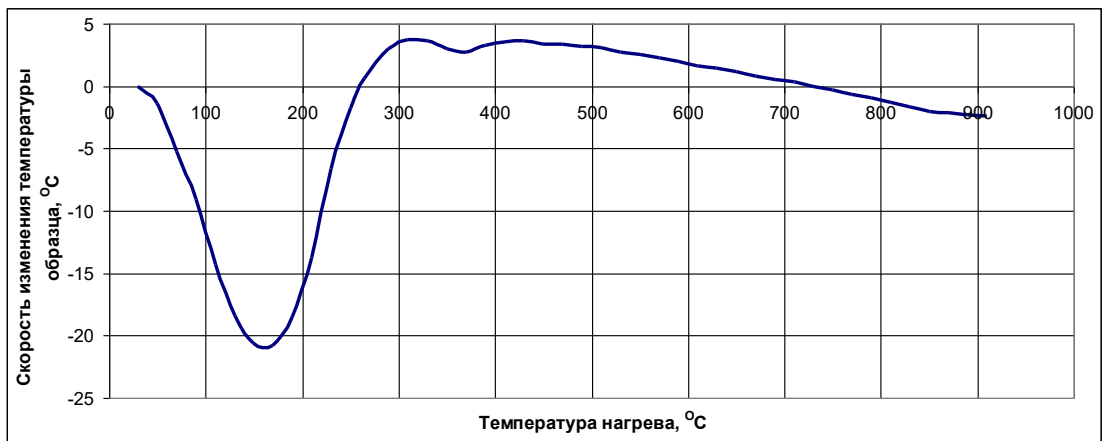
Рисунок 3.1 – Графики зависимости массы (а), скорости изменения массы (б) и скорости изменения температуры (в) в сыре «Голландский» от температуры нагрева



а

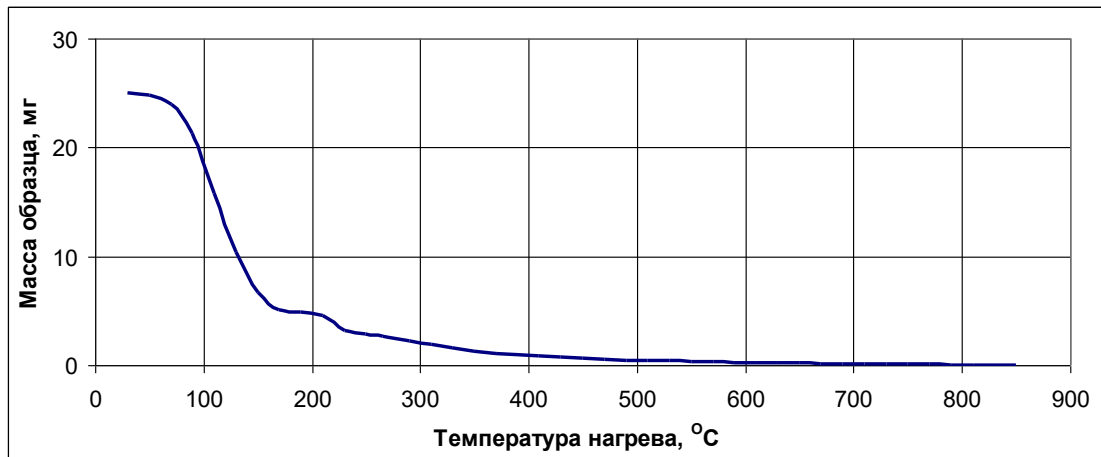


б

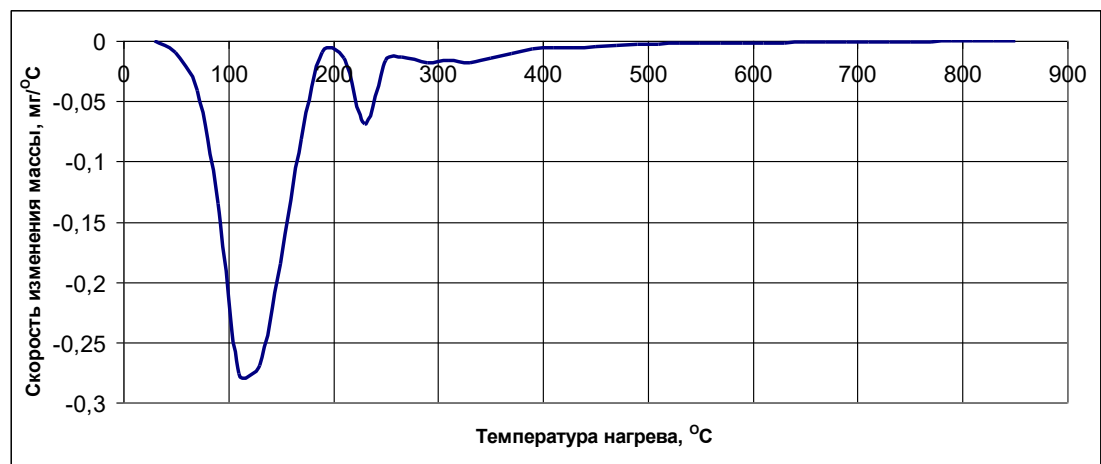


в

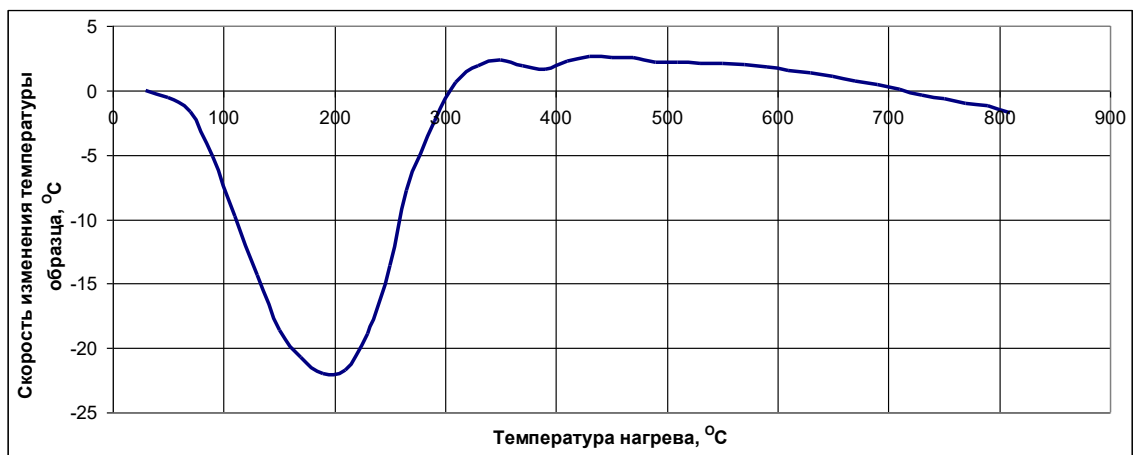
Рисунок 3.2 – Графики зависимости массы (а), скорости изменения массы (б) и скорости изменения температуры (в) в сыре «Костромской» от температуры нагрева



а



б



в

Рисунок 3.3 – Графики зависимости массы (а), скорости изменения массы (б) и скорости изменения температуры (в) в сыре «Пошехонский» от температуры нагрева

Дериватограмма полутвердых сыров имеет характерные температурные участки ступеней дегидратации, интервалы устойчивости промежуточных соединений, а также ступени деструкции веществ, которые определяются пиками эндотермических реакций, характеризующихся интенсивным испарением влаги и выделением газообразных соединений [4].

При нагреве образцов полутвердых сыров наблюдалось постоянное снижение массы, которое начиналось при температуре порядка 50°C и завершалось при температуре $700-800^{\circ}\text{C}$. На графиках скорости изменения массы наблюдаются два характерных пика: для сыра «Голландский» – на температурном интервале $63-172^{\circ}\text{C}$ и на температурном интервале $178-246^{\circ}\text{C}$. Для сыра «Костромской» эти пики соответствуют температурным интервалам – от 65 до 186°C и от 192 до 230°C , для сыра «Пошехонский» – соответственно от 68 до 187°C и от 211 до 249°C . Данные пики соответствуют двум процессам, сопровождающихся потерей массы: первый пик характеризует ступень дегидратации, второй – ступень деструкции веществ.

На графиках скорости изменения температуры образца также наблюдается пик эндотермического эффекта. Для сыров «Голландский», «Костромской» и «Пошехонский» эти пики лежат в температурных интервалах $73-202^{\circ}\text{C}$, $76-238^{\circ}\text{C}$ и $80-282^{\circ}\text{C}$ и соответствуют наибольшей скорости разложения вещества, при которых наблюдается наиболее интенсивная потеря массы исследуемого образца.

Для оценки массы кинетически неравноценных молекул воды в веществе использовался неизотермический анализ экспериментальных графиков изменения массы образцов. Участок на графике изменения массы образца, соответствующий ступени дегидратации в интервальном температурном диапазоне первого пика преобразовывался в зависимости степени превращения вещества от температуры нагрева.

Степень превращения вещества определялась по следующей формуле:

$$a = \frac{\Delta m_i}{\Delta m_{\max}}, \quad (3.1)$$

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

Графики зависимости степени превращения вещества от температуры нагрева для сыра «Голландский» представлены на рис. 3.4.

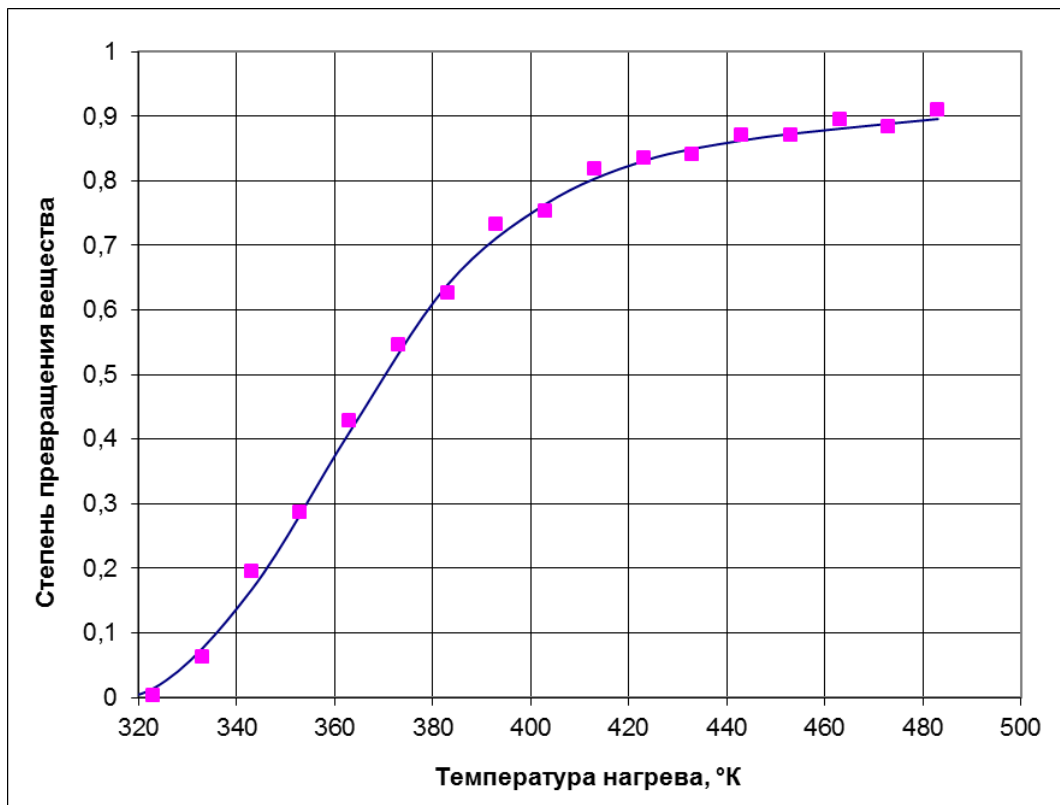


Рисунок 3.4 – Зависимость превращения вещества от температуры нагрева для сыра «Голландский»

График, представленный на рис. 3.4 отражает характер взаимодействия влаги и сухих веществ в полутвердом сыре. Из полученного графика следует, что на различных этапах нагрева вещества наблюдается различная скорость дегидратации, которая меняется по определенной закономерности.

Для того, чтобы рассмотреть более подробно формы связи влаги в полутвердых сырах была построена зависимость величины $(-lga)$ от значений

$1000/T$, представленная на рис. 3.5 на примере сыра «Голландский». На данном графике выделяются три участка, на которых происходит удаление влаги с различной формой связи.

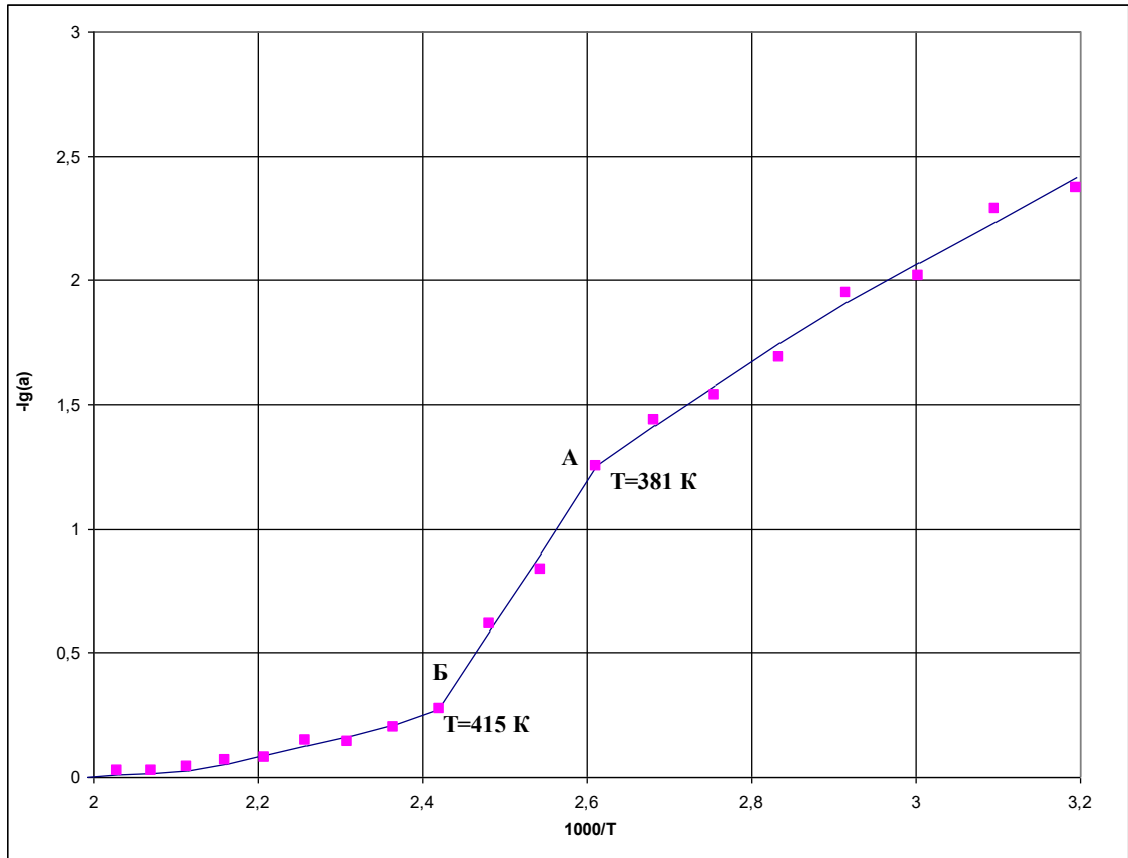


Рисунок 3.5 - Зависимость величины $(-\lg a)$ от значений $1000/T$ при нагревании сыра «Голландский»

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 [3]. При температуре 121° С в исследуемом продукте наблюдается наибольшая скорость удаления влаги.

В табл. 3.1 приведены результаты анализа кинетики дегидратации всех исследуемых полутвердых сыров.

Таблица 3.1 – Кинетика дегидратации полутвердых сыров

| Номер ступени дегидратации | $\Delta T, ^\circ C$ | 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 |

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° 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».

Таким образом, были определены периоды дегидратации воды и деструкции сухих веществ при термической обработке полутвердых сыров,

установлены температурные интервалы, на которых происходит высвобождение влаги с различной формой связи.

3.2. Определение технологических режимов вакуумной сушки полутвердых сыров

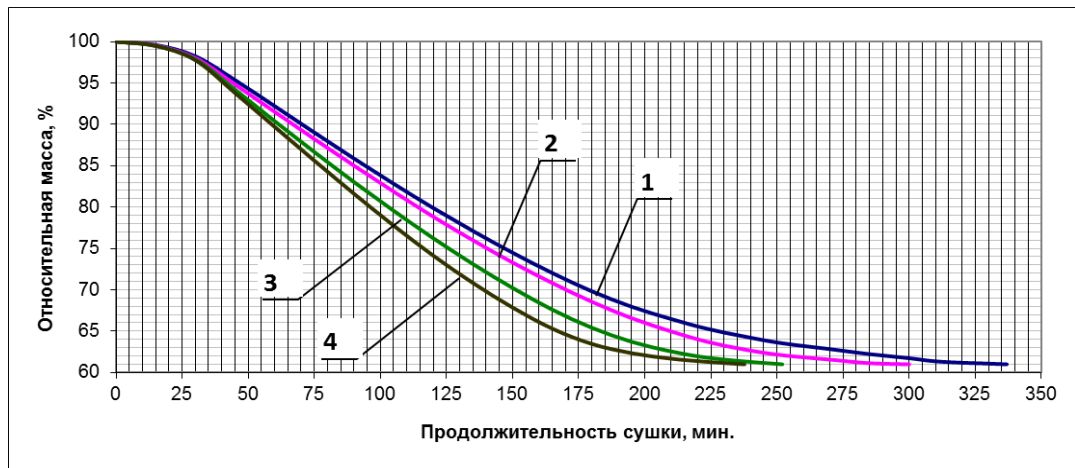
3.2.1 Температура нагрева

Подбор технологических режимов вакуумной сушки необходим для организации эффективного процесса удаления влаги, который бы позволял получить сухой продукт высокого качества при минимальных затратах энергии и максимальной производительности. Основными параметрами вакуумной сушки являются температура, остаточное давление и плотность теплового потока.

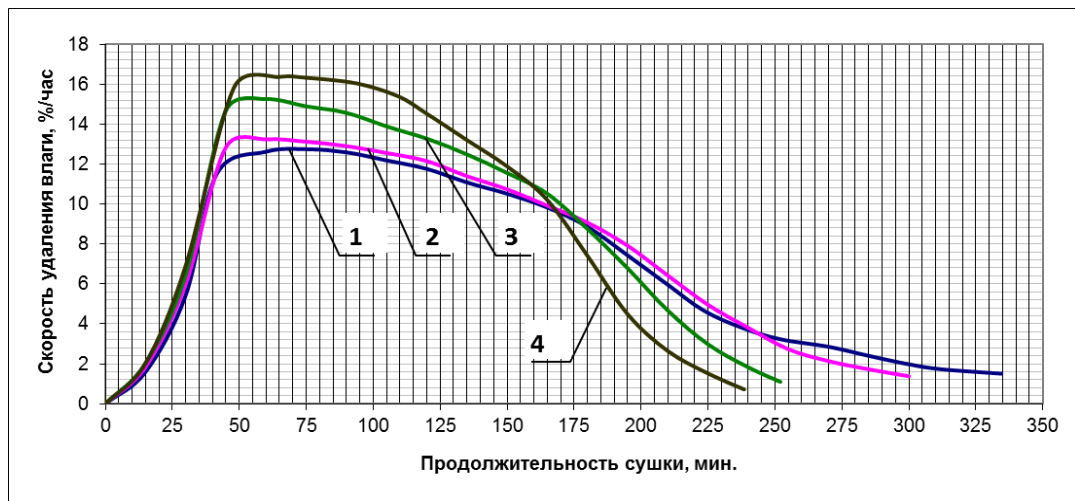
Вначале исследовали процесс вакуумной сушки полутвёрдых сыров при различной температуре нагрева. Выбор температурного режима при вакуумном обезвоживании является серьёзной задачей, поскольку повышение температуры нагрева влияет на процесс неоднозначно: с одной стороны происходит интенсификация удаления влаги из вещества, с другой стороны чрезмерное термическое воздействие ведет к значительному снижению качества готового продукта.

Сыр перед сушкой нарезался кубиками, размером 15x15x15 мм и укладывался на поддон в один слой. Опыты проводили при остаточном давлении в камере 3-4 кПа и плотности теплового потока $5 \pm 0,5$ кВт/м². Сушку продукта осуществляли при температуре нагрева 40, 50, 60 и 70° С.

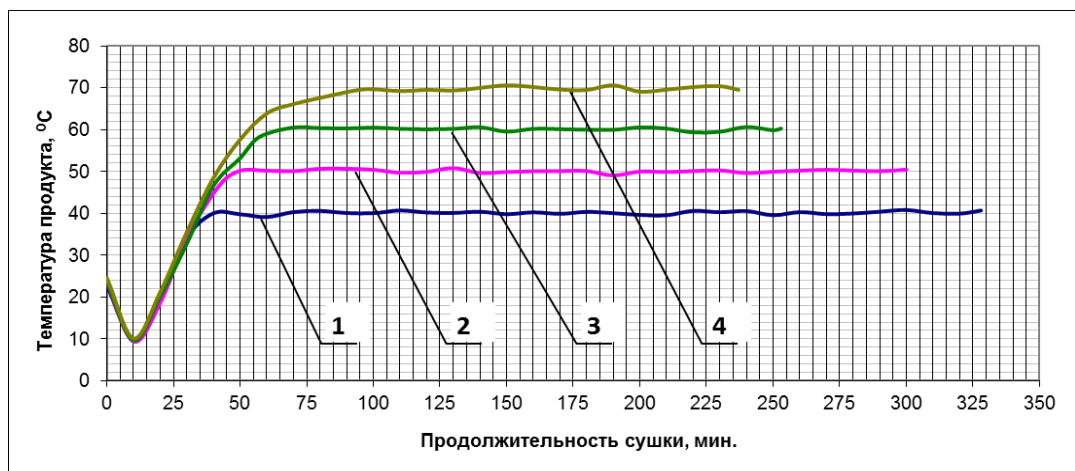
На рис. 3.6-3.8 изображены графики, полученные в ходе обезвоживания полутвердых сыров, такие как изменение относительной массы, скорость изменения относительной массы и температуры в продукте. [25]



а



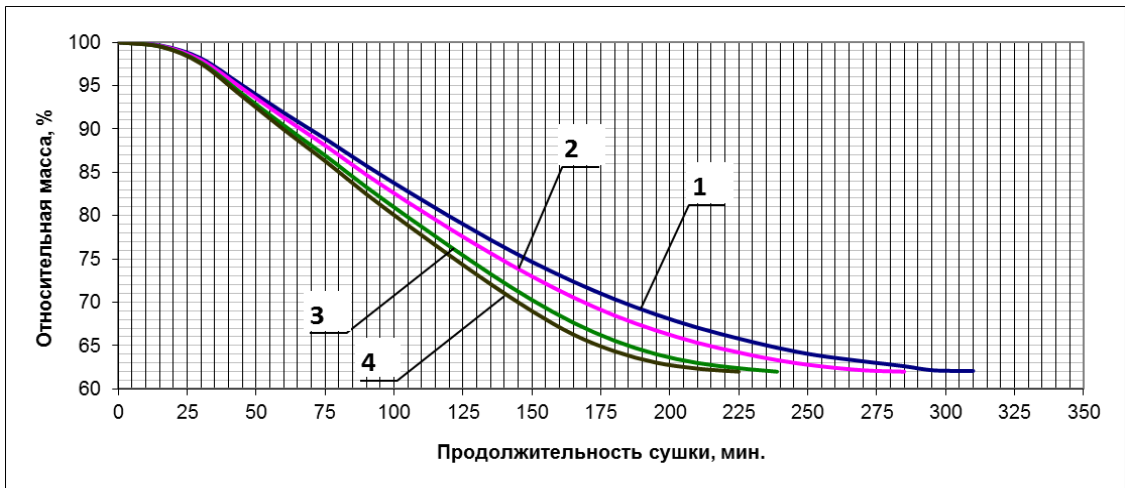
б



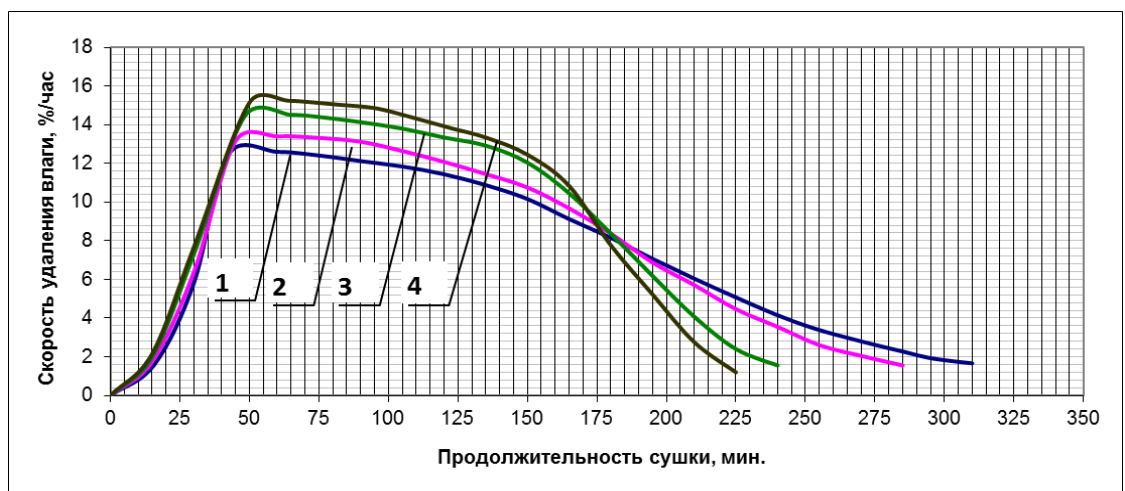
в

Рисунок 3.6 – Графики изменения относительной массы (а), скорости изменения относительной массы (б) и температуры в продукте (в) в процессе вакуумной сушки сыра «Голландский» при температуре нагрева:

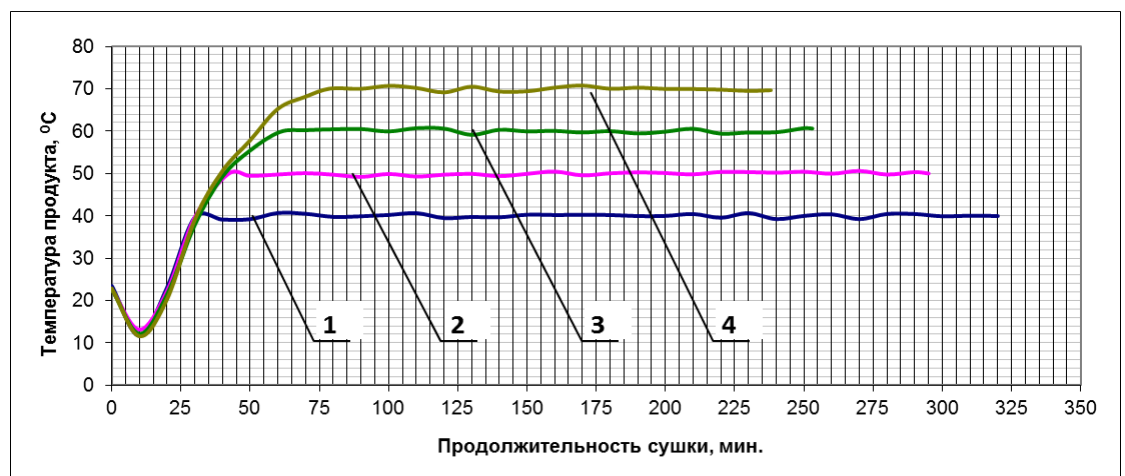
1 - 40° С; 2 - 50° С; 3 - 60° С; 4 – 70° С



а



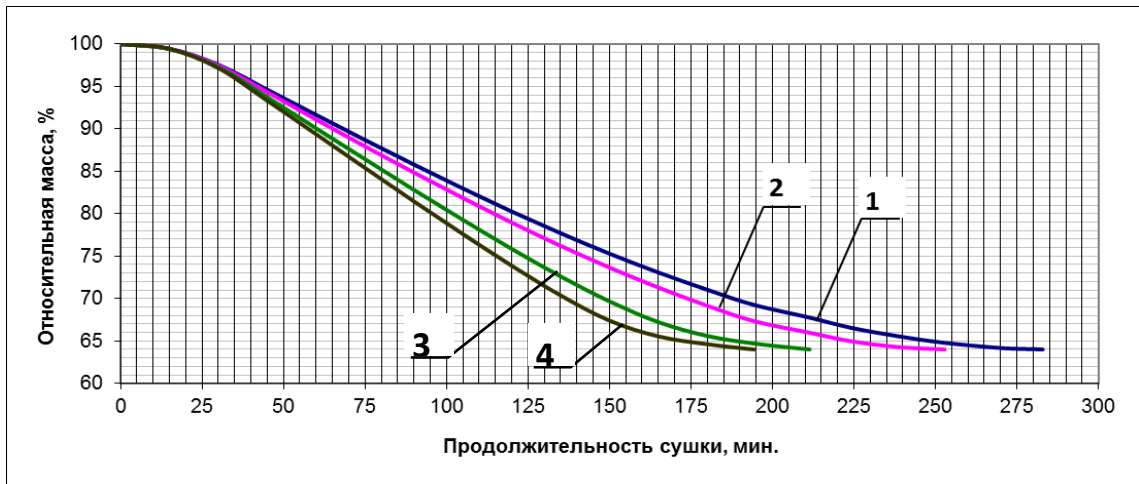
б



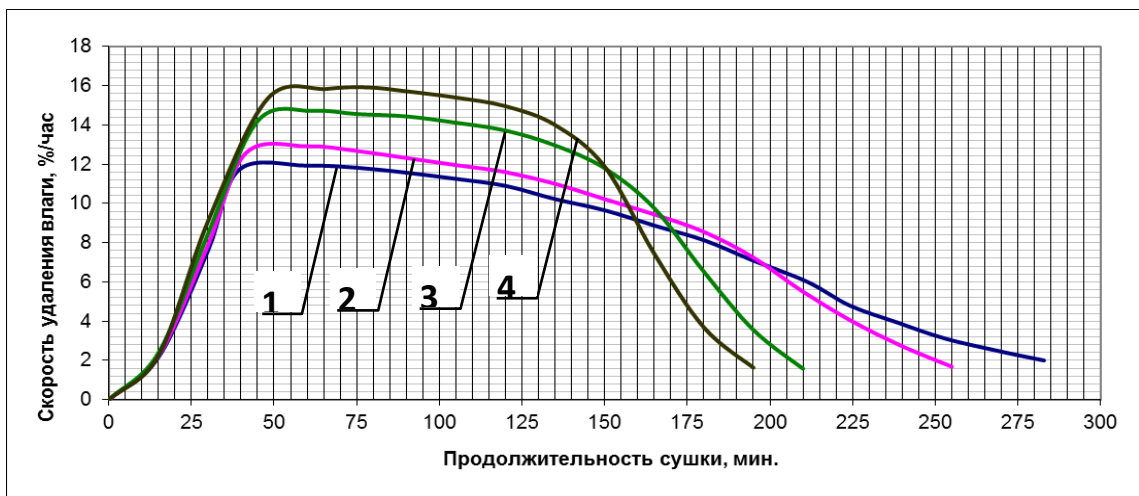
в

Рисунок 3.7 – Графики изменения относительной массы (а), скорости изменения относительной массы (б) и температуры в продукте (в) в процессе вакуумной сушки сыра «Костромской» при температуре нагрева:

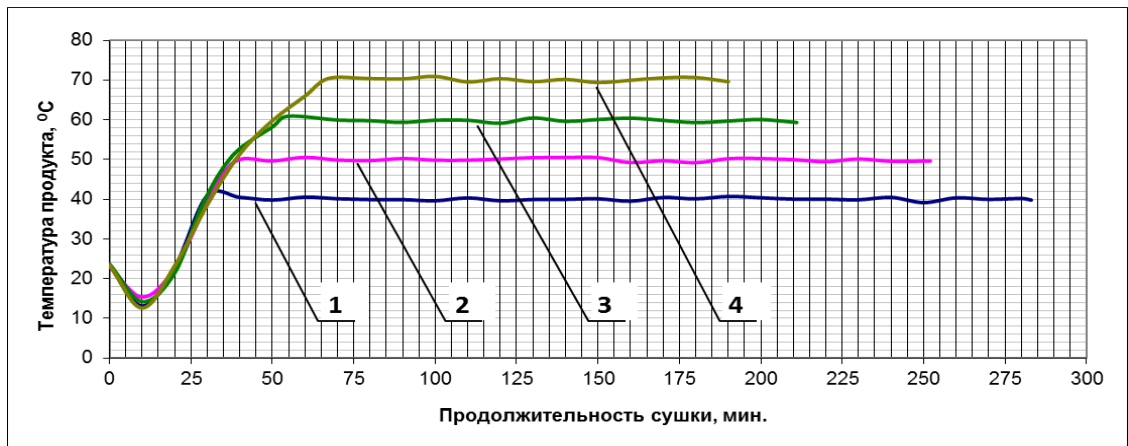
1 - 40° С; 2 - 50° С; 3 - 60° С; 4 – 70° С



а



б



в

Рисунок 3.8 – Графики изменения относительной массы (а), скорости изменения относительной массы (б) и температуры в продукте (в) в процессе вакуумной сушки сыра «Пошехонский» при температуре нагрева:

1 - 40° C; 2 - 50° C; 3 - 60° C; 4 – 70° C

Как правило, вакуумную сушку рассматривают как двухстадийный процесс, включающий в себя периоды постоянной и падающей скорости сушки. В нашем случае будем пользоваться трехстадийным описанием процесса, поскольку в данном случае также имеет место этап выхода сушильной установки на рабочий режим.

После включения вакуум-насоса происходит понижение давления в камере, вследствие чего наблюдается снижение температуры продукта на несколько градусов. Продолжительность выхода установки на рабочий режим составляет порядка 10 мин. За это время в камере создается установленная глубина вакуума, а в десублиматоре температура поверхности испарителя достигает необходимого значения. Относительная масса продукта меняется незначительно, на данном этапе происходит удаление влаги макрокапилляров продукта.

После выхода установки на рабочий режим включался источник подвода теплоты – инфракрасные лампы. При этом наблюдается значительный рост температуры продукта и скорости удаления влаги, наступает вторая стадия сушки. Наибольшая скорость удаления влаги наблюдалась через 40-55 мин после начала процесса обезвоживания 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. При повышении температуры нагрева до 60, 60 и 70° С это время увеличивалось соответственно до 40-50, 55-65 и 70-90 мин.

Второй этап сушки характеризуется относительно постоянной скоростью удаления влаги. При этом из сыров удаляется основная часть воды - осмотически-связанная влага и влага микрокапилляров. Установлено, что чем выше температура нагрева, тем меньше продолжительность второго этапа обезвоживания и тем более отчетливо выделяется данный этап на графиках скорости сушки.

Продолжительность второго этапа сушки составляет около 120 мин. при температурах нагрева 40 и 50° С и порядка 100-110 мин. при температурах сушки в 60 и 70° С. По завершении второго периода скорость обезвоживания начинает заметно снижаться и наступает третья стадия сушки.

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».

В рамках исследований был проведен анализ содержания влаги и жира в сухом веществе при вакуумной сушке сыров с различными температурными режимами. На рис. 3.9 представлены соответствующие графики.

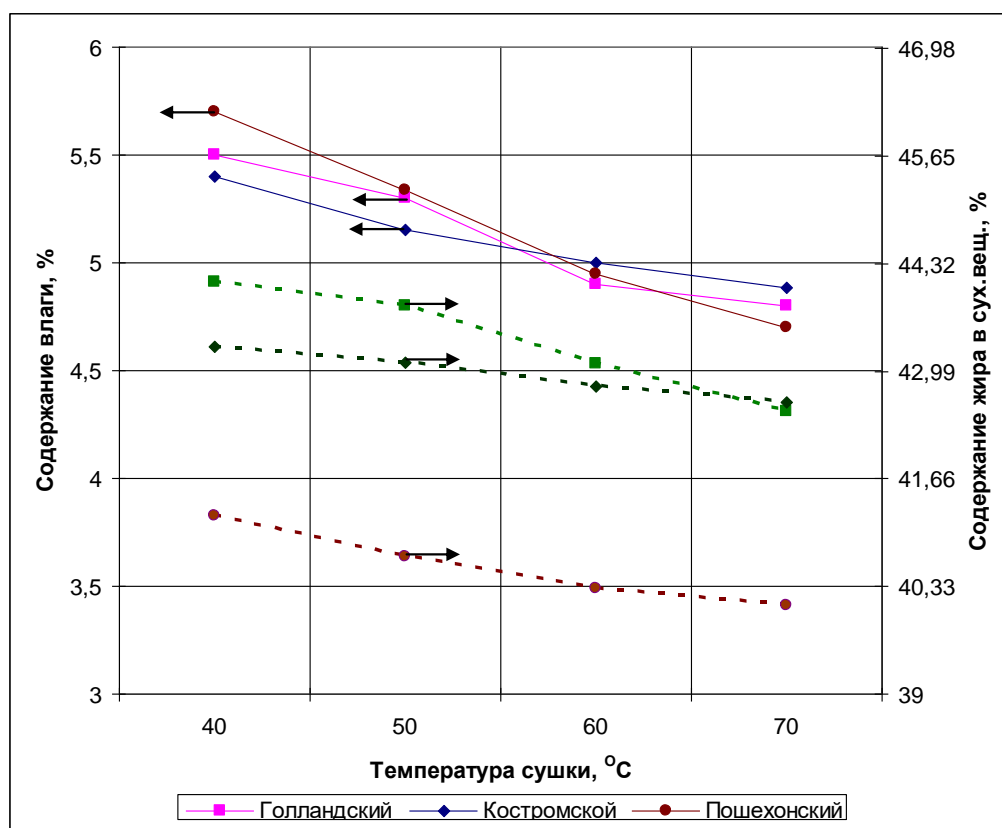


Рисунок 3.9 – Содержание жира в сухом веществе и влаги в полутвердых сырах после вакуумной сушки при подборе температуры

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.

Для разработки математических зависимостей были построены графики изменения влагосодержания от времени сушки (рис. 3.9).

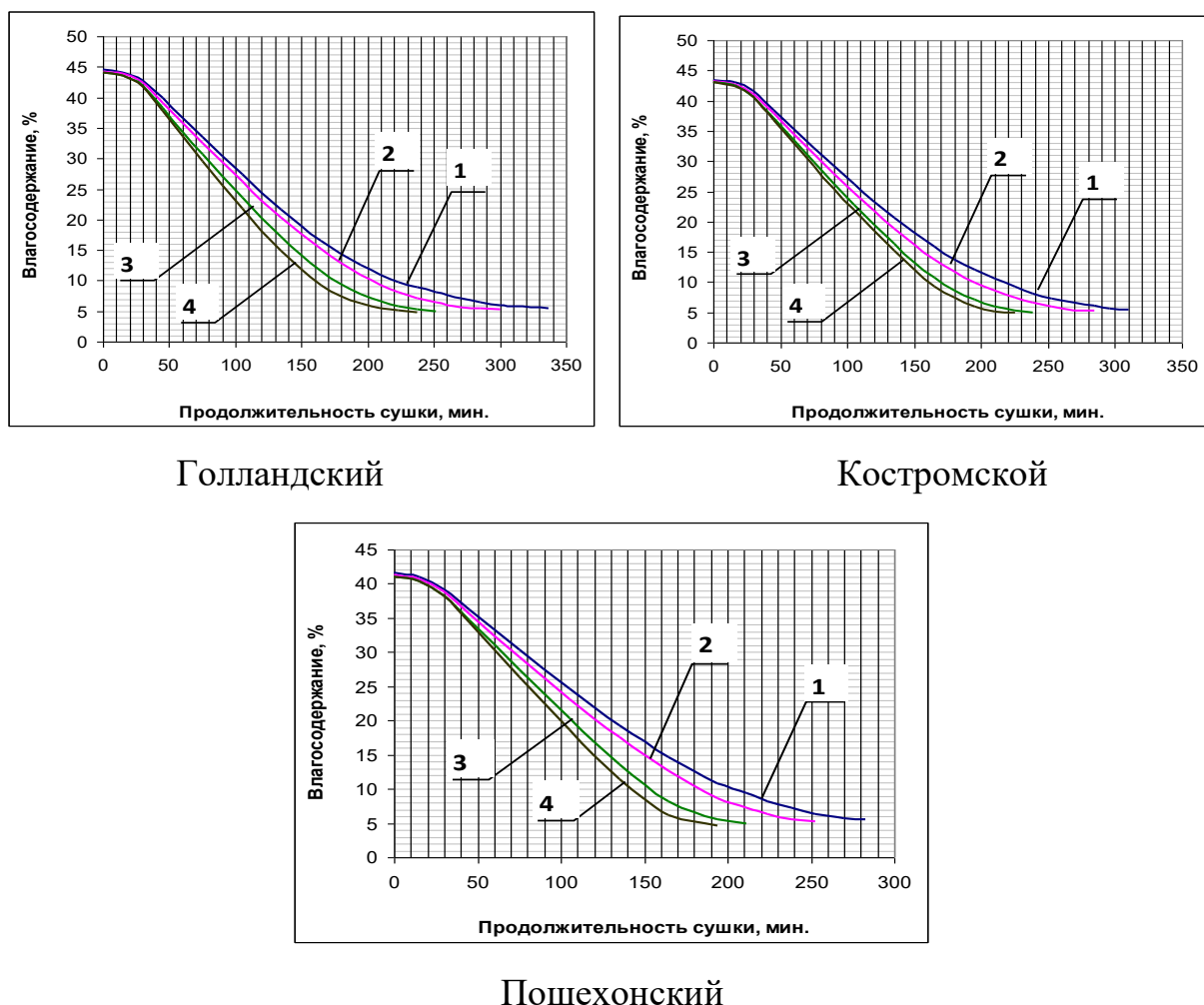


Рисунок 3.9 – Изменение влагосодержания полутвердых сыров в процессе вакуумной сушки при температуре нагрева:

1 - 40° С; 2 - 50° С; 3 - 60° С; 4 – 70° С

По вышеприведенным графикам были получены уравнения регрессии, позволяющие определить влагосодержание сыра в данный момент времени в процессе сушки (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Уравнения влагосодержания полутвердых сыров при вакуумной сушке с различной температурой нагрева

| Наименование сыра | Температура сушки, °С | Уравнение регрессии | Достоверность аппроксимации, R^2 |
|-------------------|-----------------------|--|------------------------------------|
| Голландский | 40 | $U = 0,0003\tau^2 - 0,246\tau + 48,5$ | 0,9916 |
| | 50 | $U = 0,0004\tau^2 - 0,2455\tau + 48,19$ | 0,9908 |
| | 60 | $U = 0,0004\tau^2 - 0,2757\tau + 47,86$ | 0,9887 |
| | 70 | $U = 0,0005\tau^2 - 0,3027\tau + 48,212$ | 0,9857 |
| Костромской | 40 | $U = 0,0003\tau^2 - 0,2392\tau + 47,045$ | 0,9927 |
| | 50 | $U = 0,0004\tau^2 - 0,2554\tau + 46,993$ | 0,9908 |
| | 60 | $U = 0,0004\tau^2 - 0,2665\tau + 46,638$ | 0,9883 |
| | 70 | $U = 0,0003\tau^2 - 0,2716\tau + 46,56$ | 0,9877 |
| Пошехонский | 40 | $U = 0,0003\tau^2 - 0,2257\tau + 44,546$ | 0,9935 |
| | 50 | $U = 0,0003\tau^2 - 0,2346\tau + 44,234$ | 0,9922 |
| | 60 | $U = 0,0003\tau^2 - 0,2556\tau + 44,045$ | 0,9882 |
| | 70 | $U = 0,0003\tau^2 - 0,2672\tau + 44,093$ | 0,9866 |

где U – влагосодержание, %; τ – время от начала сушки, мин.

Органолептическую оценку сухих сыров проводили по анализу четырех показателей:

- вкус (10-бальная шкала);
- цвет (10-бальная шкала);
- форма и консистенция (10-бальная шкала);
- запах (10-бальная шкала).

Итого суммарная максимальная оценка составляла 40 баллов.

Результаты анализа органолептических показателей сухих сыров представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – 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 полутвердых 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. При данной температуре нагрева продолжительность обезвоживания составляет 255-310 мин. для различных видов сыров, а органолептическая оценка равна 34-36 баллов из 40.

3.2.2 Остаточное давление

На следующем этапе производили подбор эффективного значения остаточного давления в камере. Экспериментальные исследования проводили при выбранной ранее температуре сушки в 50° С и плотности теплового потока $5 \pm 0,5$ кВт/м². Остаточное давление в различных опытах составляло 2-3, 3-4, 5-6 и 7-8 кПа.

На рис. 3.10 приведены графики зависимости продолжительности сушки полутвердых сыров от величины остаточного давления. [23]

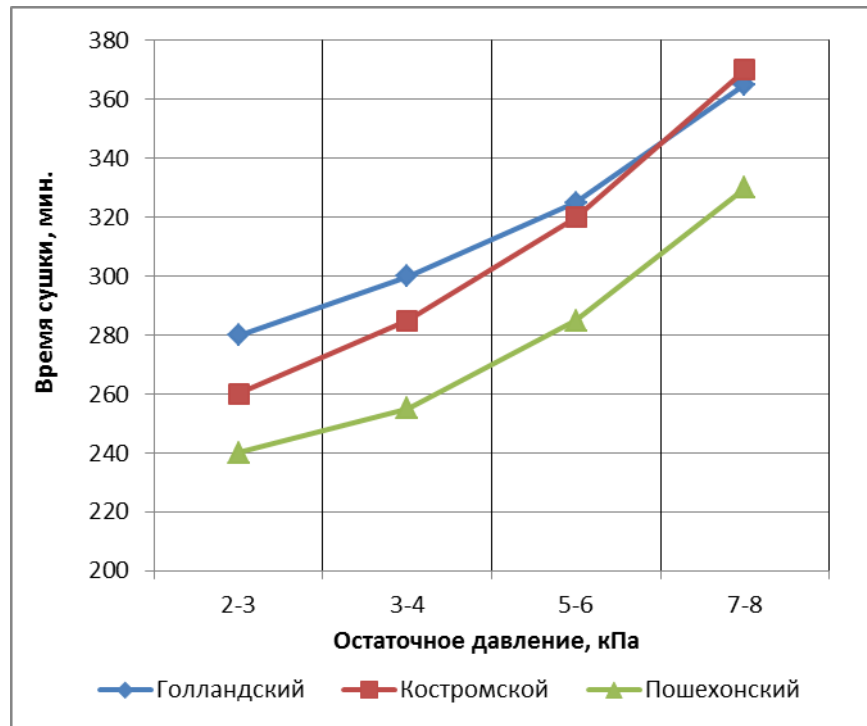
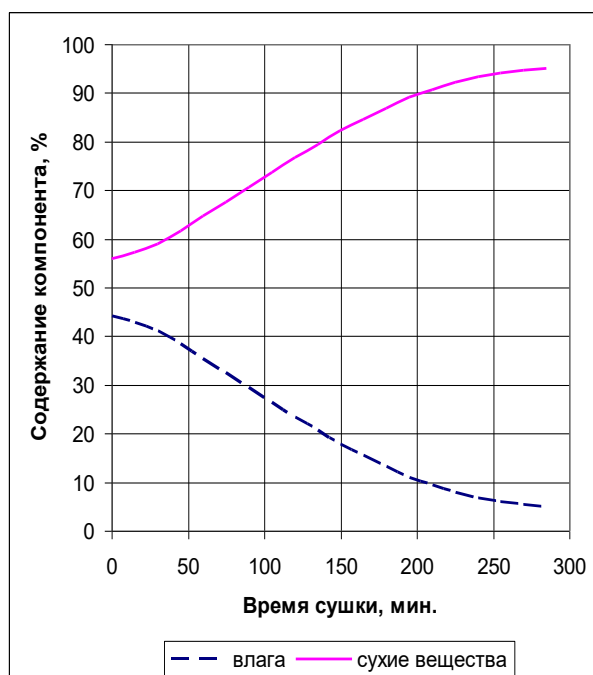


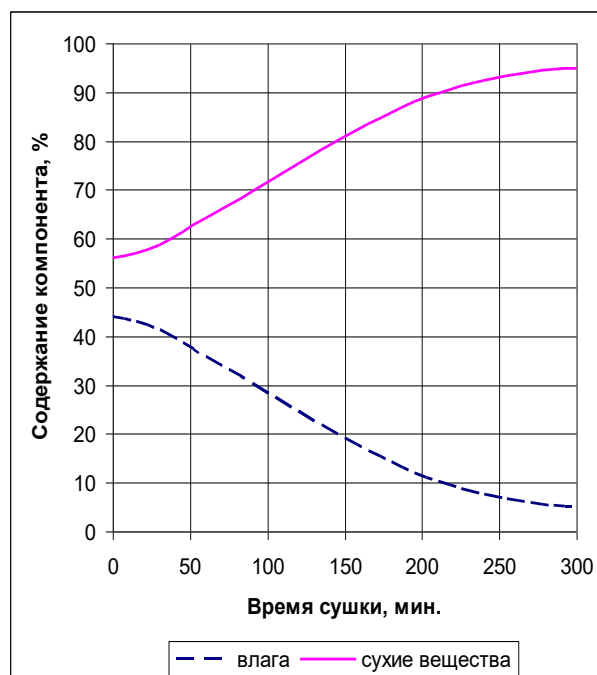
Рисунок 3.10 – Графики зависимости продолжительности вакуумной сушки полутвердых сыров от величины остаточного давления

В ходе исследований было обнаружено, что сушка при более высоких значениях остаточного давления обуславливает большую продолжительность обезвоживания. Это обусловлено тем фактом, что при повышении остаточного давления снижается градиент давлений между продуктом (сыром) и окружающей средой, а также повышается температура кипения и изменяется теплоемкость окружающей среды. При повышении остаточного давления от 2-3 кПа до 3-4 кПа наблюдается увеличение времени обезвоживания в среднем на 8%. Увеличение остаточного давления от 3-4 кПа до 5-6 кПа влечет за собой дальнейший рост продолжительности сушки на 10%. Наибольшая продолжительность сушки (от 330 мин для сыра «Пошехонский» до 370 мин. для сыра «Костромской») наблюдалась при остаточном давлении 7-8 кПа

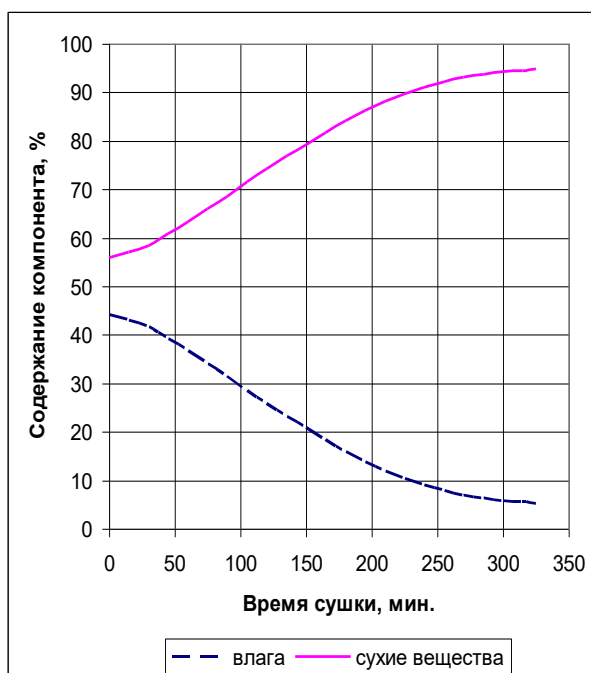
Графики зависимости влагосодержания и сухих веществ полутвердых сыров от продолжительности вакуумной сушки при различном остаточном давлении представлены на рис. 3.11-3.13.



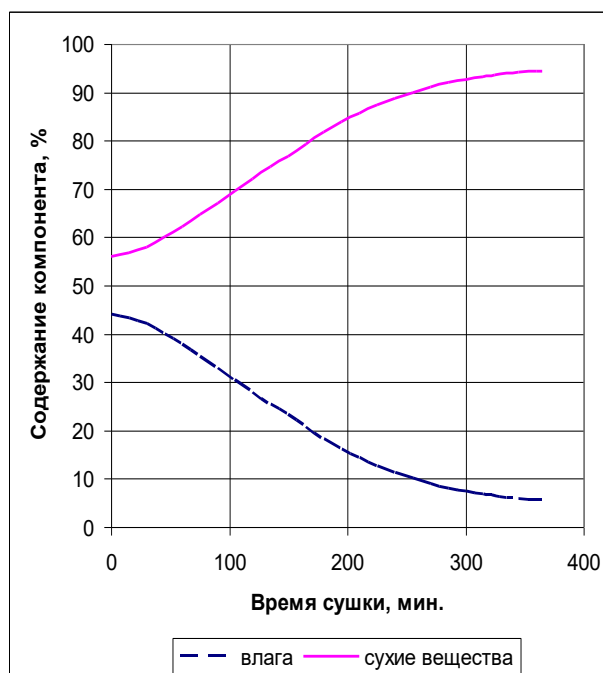
а



б

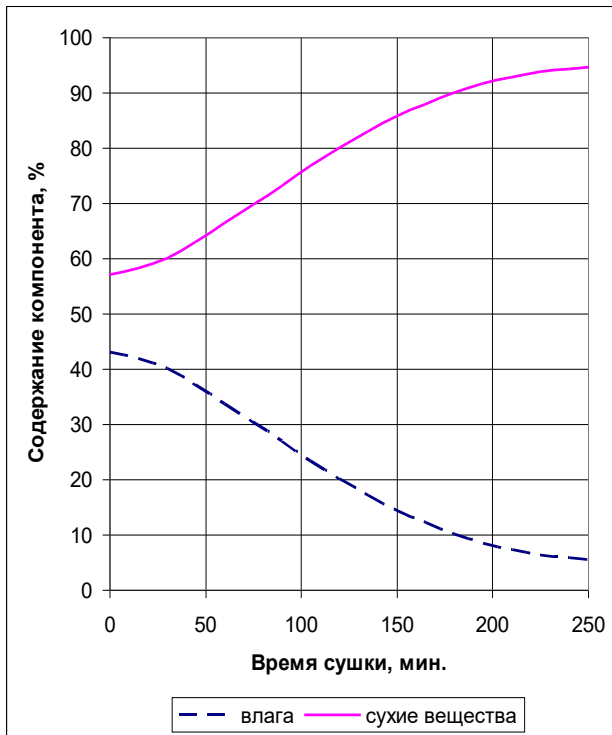


в

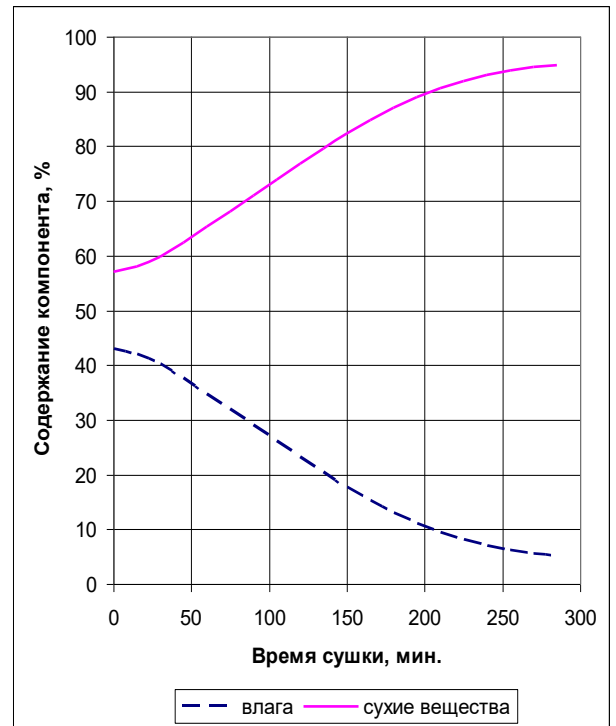


г

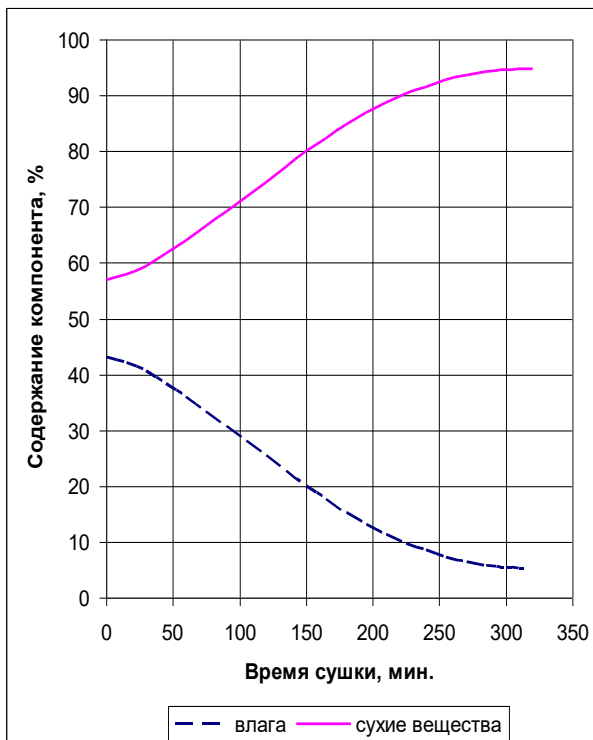
Рисунок 3.11 – Графики зависимости содержания влаги и сухих веществ в сыре «Голландский» от продолжительности вакуумной сушки при остаточном давлении: а – 2-3 кПа; б – 3-4 кПа; в – 5-6 кПа; г – 7-8 кПа



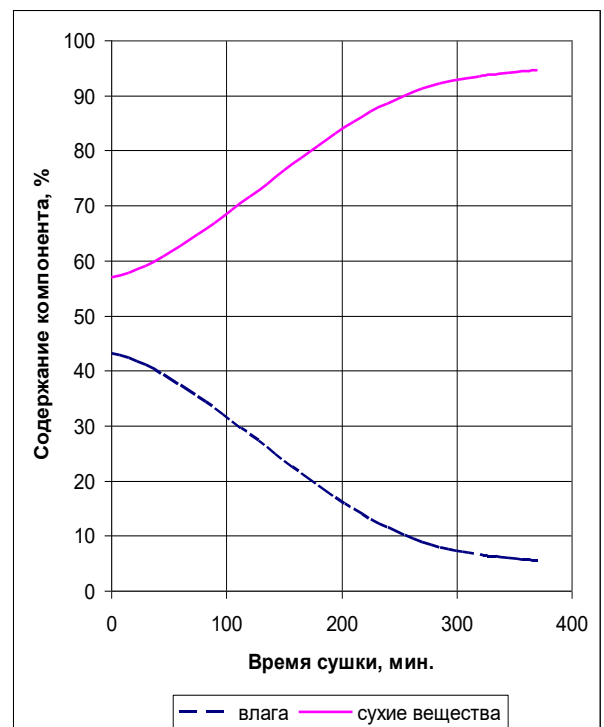
а



б

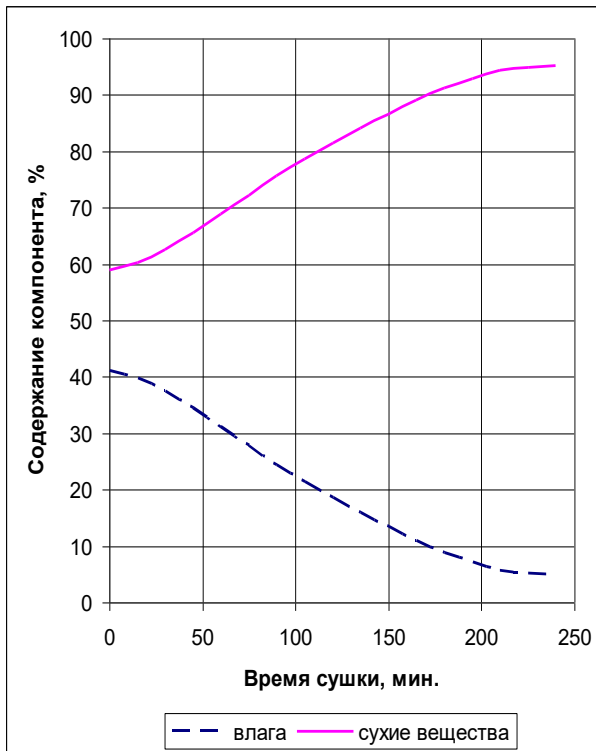


в

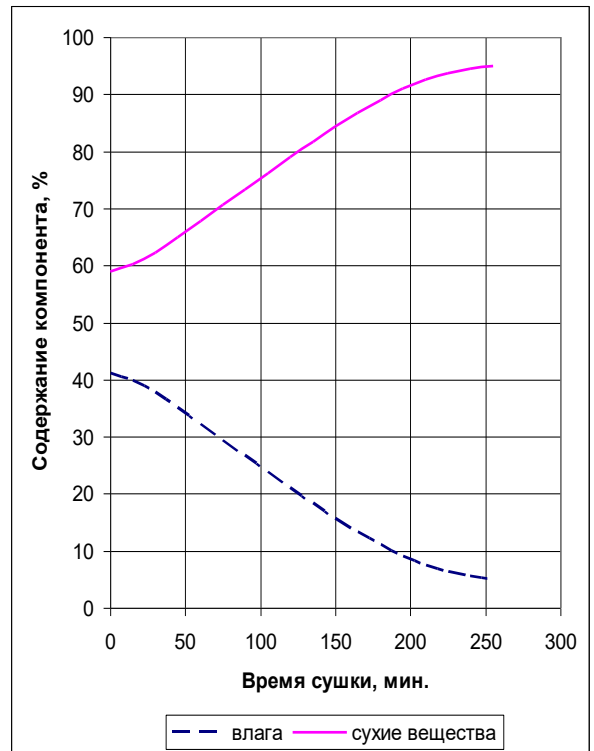


г

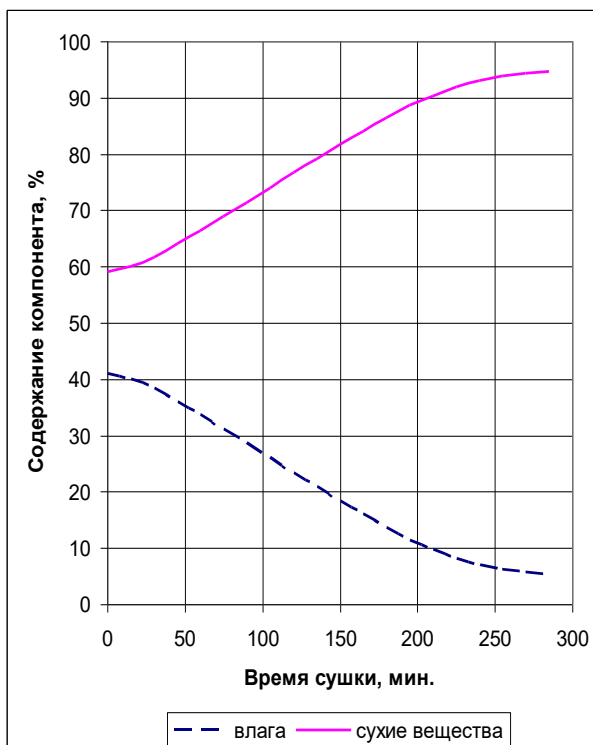
Рисунок 3.12 – Графики зависимости содержания влаги и сухих веществ в сыре «Костромской» от продолжительности вакуумной сушки при остаточном давлении: а – 2-3 кПа; б – 3-4 кПа; в – 5-6 кПа; г – 7-8 кПа



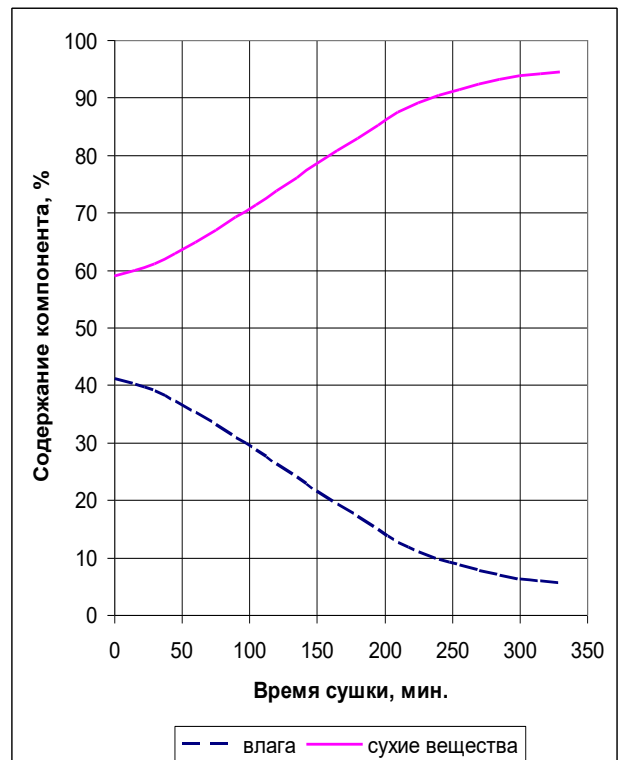
а



б



в



г

Рисунок 3.13 – Графики зависимости содержания влаги и сухих веществ в сыре «Пошехонский» от продолжительности вакуумной сушки при остаточном давлении: а – 2-3 кПа; б – 3-4 кПа; в – 5-6 кПа; г – 7-8 кПа

По графикам, представленным на рис. 3.11-3.13, были получены математические выражения, позволяющие определить влагосодержание полутвердых сыров в любой момент времени сушки:

$$\text{Для сыра «Голландский»:} \begin{cases} P = 2 - 3кПа; U = 0,0003\tau^2 - 0,2326\tau + 46,928; \\ P = 3 - 4кПа; U = 0,0003\tau^2 - 0,2241\tau + 47,002; \\ P = 5 - 6кПа; U = 0,0002\tau^2 - 0,2144\tau + 47,175; \\ P = 7 - 8кПа; U = 0,0002\tau^2 - 0,1994\tau + 47,48 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\text{Для сыра «Костромской»:} \begin{cases} P = 2 - 3кПа; U = 0,0004\tau^2 - 0,259\tau + 46,196; \\ P = 3 - 4кПа; U = 0,0003\tau^2 - 0,2242\tau + 45,874; \\ P = 5 - 6кПа; U = 0,0002\tau^2 - 0,2078\tau + 46,123; \\ P = 7 - 8кПа; U = 0,0002\tau^2 - 0,1852\tau + 46,452 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\text{Для сыра «Пошехонский»:} \begin{cases} P = 2 - 3кПа; U = 0,0003\tau^2 - 0,2433\tau + 43,39; \\ P = 3 - 4кПа; U = 0,0002\tau^2 - 0,2129\tau + 43,226; \\ P = 5 - 6кПа; U = 0,0002\tau^2 - 0,19524\tau + 43,479; \\ P = 7 - 8кПа; U = 0,0002\tau^2 - 0,1763\tau + 43,895 \end{cases} \quad (3.4)$$

Величина содержания влаги в обезвоженных полутвердых сырах представлена в табл. 3.4.

Таблица 3.5 – Влагосодержание в сухих полутвердых сырах при различном остаточном давлении вакуумной сушки, %

| Наименование сыра | Остаточное давление, кПа | | | |
|-------------------|--------------------------|------|------|------|
| | 2-3 | 3-4 | 5-6 | 7-8 |
| Голландский | 4,92 | 5,29 | 5,37 | 5,73 |
| Костромской | 4,70 | 5,06 | 5,16 | 5,63 |
| Пошехонский | 4,85 | 5,31 | 5,55 | 5,72 |

В ходе исследований было обнаружено, что сушка при большем остаточном давлении обуславливает некоторое повышение содержания влаги в сухих сырах. Однако эта разница незначительна и составляет менее 1%. Это может быть вызвано изменением разницы давлений между внутренним объ-

емом продукта и окружающей средой, что в свою очередь вызывает уменьшение интенсивности перемещения влаги к наружной поверхности продукта. Наименьшее влагосодержание (4,70 – 4,92%) было у сыров, высушенных при остаточном давлении 2-3 кПа.

Данные по органолептическим показателям сухих сыров приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Органолептическая оценка сухих полутвердых сыров при подборе остаточного давления вакуумной сушки, баллы

| Наименование сыра | Остаточное давление, кПа | | | |
|-------------------|--------------------------|-----|-----|-----|
| | 2-3 | 3-4 | 5-6 | 7-8 |
| Голландский | 30 | 33 | 34 | 35 |
| Костромской | 30 | 35 | 36 | 37 |
| Пошехонский | 31 | 35 | 37 | 37 |

Анализируя представленные результаты, можно прийти к выводу о том, что рациональное остаточное давление при вакуумной сушке полутвердых сыров составляет 3-4 кПа. При повышении остаточного давления увеличивается продолжительность удаления влаги, органолептические характеристики при этом повышаются всего на 1-2 балла. Сушка при меньших значениях остаточного давления вызывает ухудшение качественных показателей сыров в среднем на 3-5 баллов, продолжительность сушки при этом уменьшается всего на 15-25 мин.

3.2.3 Плотность теплового потока

Помимо температуры и остаточного давления плотность теплового потока (тепловая нагрузка) также является важным параметром, влияющим на скорость нагрева и эффективность сушки в целом. Тепловая нагрузка определяется как количество энергии, подведенной к единице площади и выражается в кВт/м².

Проводили исследования при ранее подобранных значениях температуры нагрева (50°C), остаточного давления (3-4 кПа) и различных значениях плотности теплового потока. Последний параметр в различных опытах составлял от 1 до 10 кВт/м^2 с шагом в 1 кВт/м^2 .

Графики зависимости температуры и плотности теплового потока от продолжительности процесса вакуумной сушки сыра «Голландский» приведены на рис. 3.14-3.16.

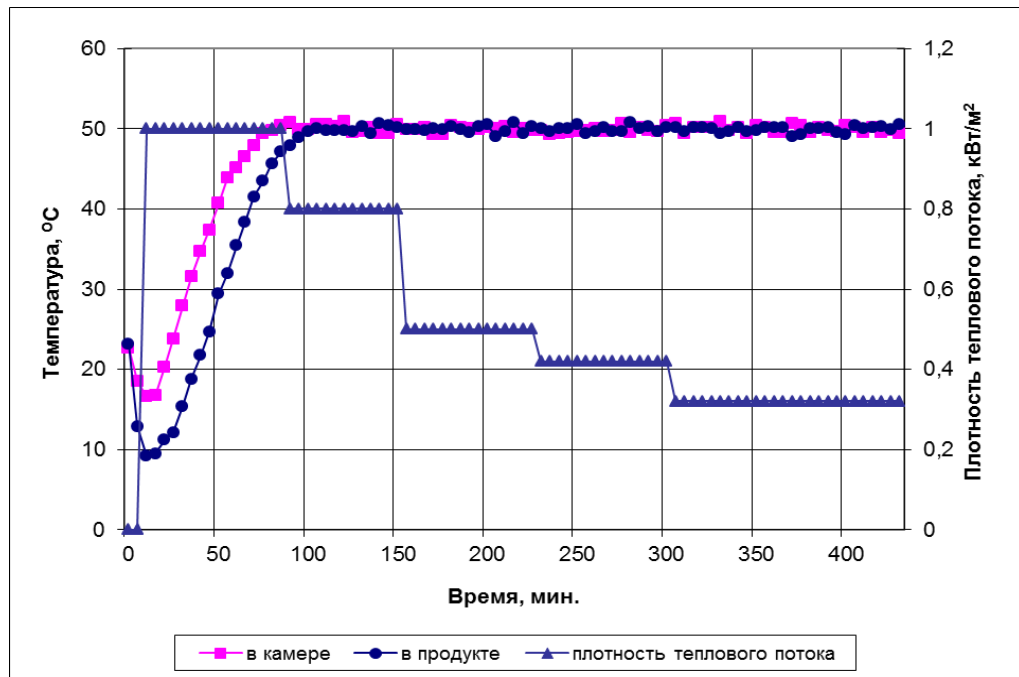


Рисунок 3.14 – Графики зависимости температуры и плотности теплового потока от продолжительности вакуумной сушки сыра «Голландский» при заданной плотности теплового потока 1 кВт/м^2

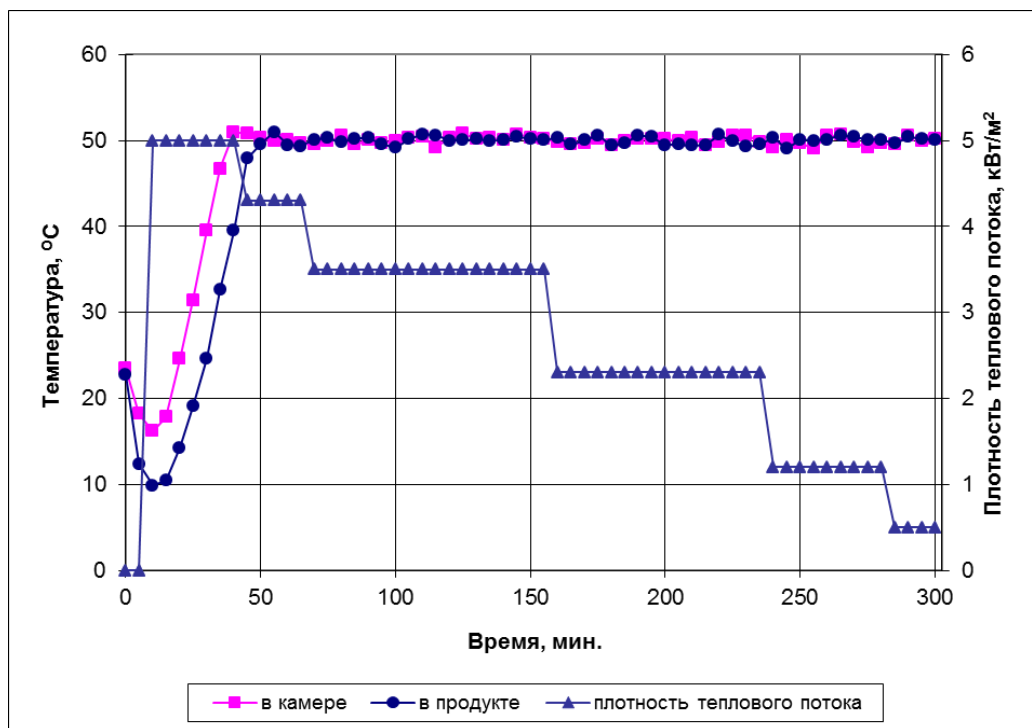


Рисунок 3.15 – Графики зависимости температуры и плотности теплового потока от продолжительности вакуумной сушки сыра «Голландский» при заданной плотности теплового потока 5 кВт/м²

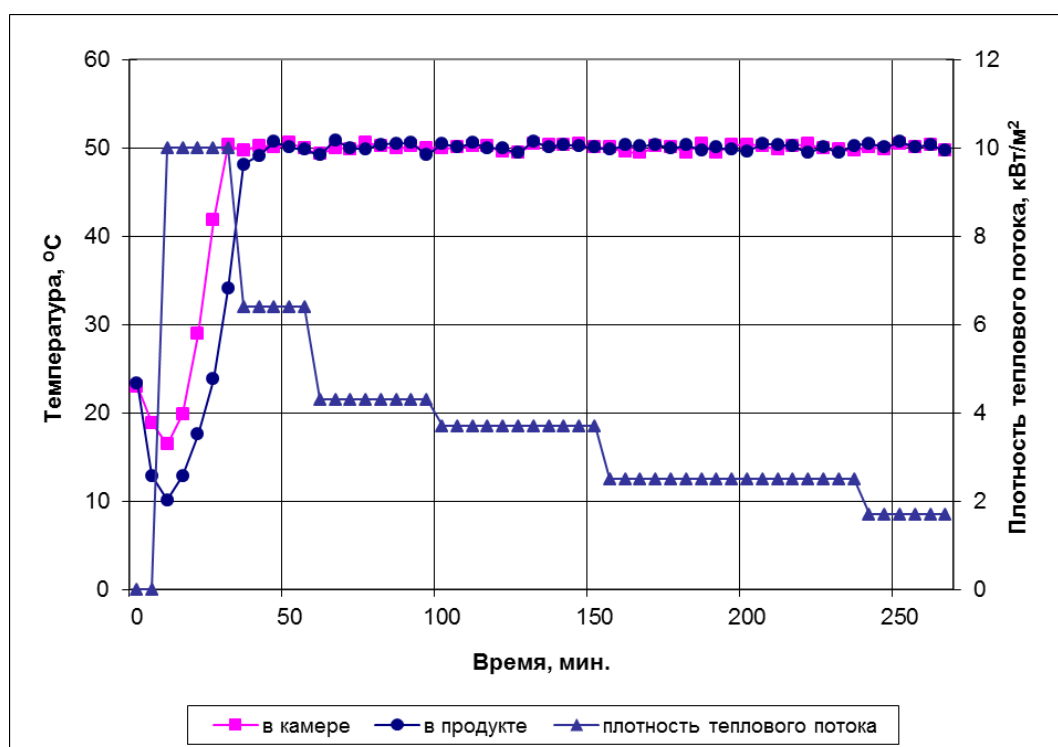


Рисунок 3.16 – Графики зависимости температуры и плотности теплового потока от продолжительности вакуумной сушки сыра «Голландский» при заданной плотности теплового потока 10 кВт/м²

В самом начале сушки лампы нагрева работают при установленном значении плотности теплового потока. После того, как температура продукта достигает заданного значения тепловая нагрузка ламп начинает снижаться. Чем выше установленная плотность теплового потока, тем меньше требуется времени для прогрева продукта до требуемого уровня. Например, при установленной плотности теплового потока 1 кВт/м^2 сыр «Голландский» прогревался до нужной температуры через 100 мин. после начала сушки, а при установленной плотности теплового потока 10 кВт/м^2 – через 40 мин.

Графики зависимости энергетических затрат и продолжительности сушки сыров от установленной плотности теплового потока приведены на рис. 3.17. [24]

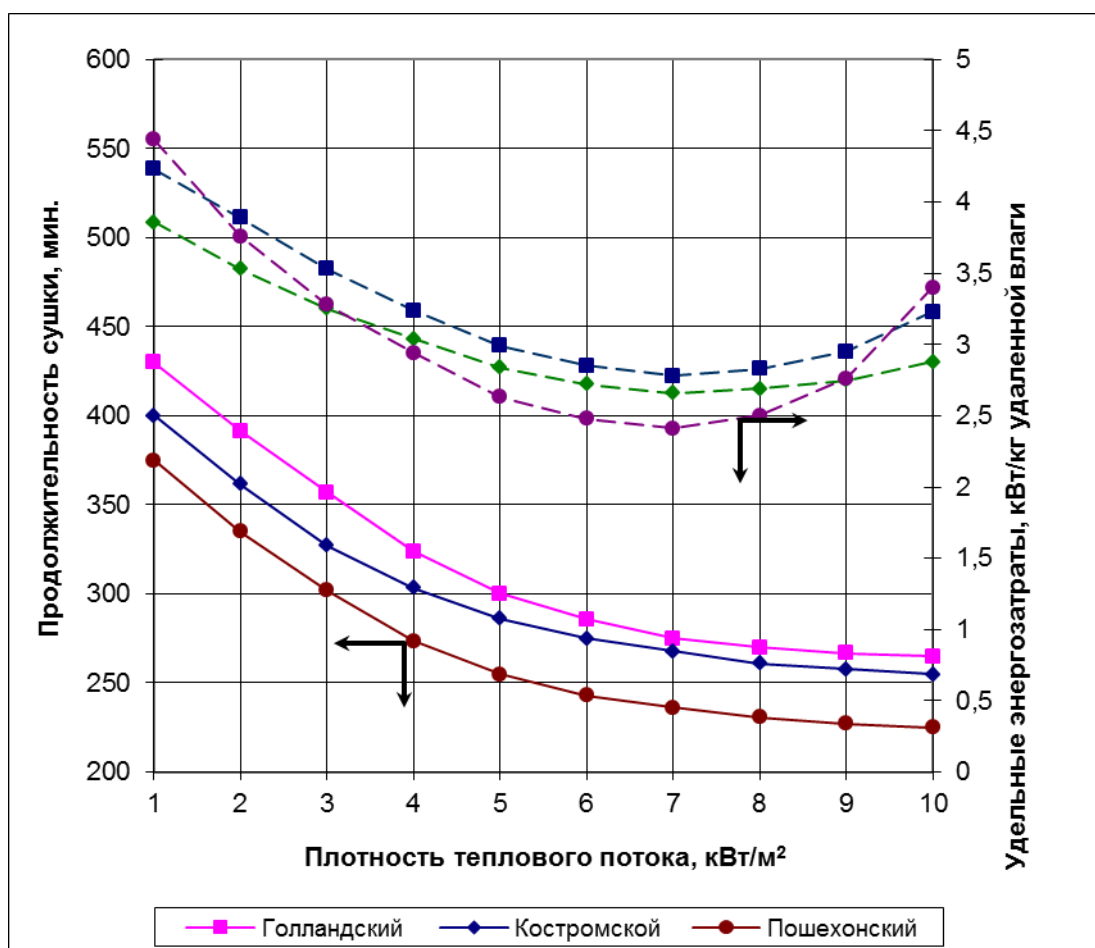


Рисунок 3.17 – Графики зависимости энергетических затрат и продолжительности вакуумной сушки полутвердых сыров от установленной плотности теплового потока

Было обнаружено значительное сокращение продолжительности обезвоживания (от 30 до 45 мин для различных сыров) при повышении установленной плотности теплового потока от 1 до 5-6 кВт/м². При дальнейшем увеличении данного параметра не наблюдается заметного сокращения продолжительности сушки.

Изменение тепловой нагрузки действует неоднозначно на энергозатраты при сушке. С одной стороны с повышением плотности теплового потока снижается продолжительность обезвоживания, что в целом сокращает затраты энергии, однако это происходит до определенного момента, после которого дальнейший рост тепловой нагрузки напротив увеличивает энергозатраты вследствие незначительного сокращения времени сушки на фоне заметного роста энергопотребления сушильных ламп. Сушка с наименьшими энергозатратами (2,5-2,7 кВт/кг удаленной влаги) наблюдалась при тепловой нагрузке в 7-8 кВт/м².

Результаты качественной оценки сухих полутвердых сыров при подборе установленной тепловой нагрузки приведены в виде диаграмм на рис. 3.18.

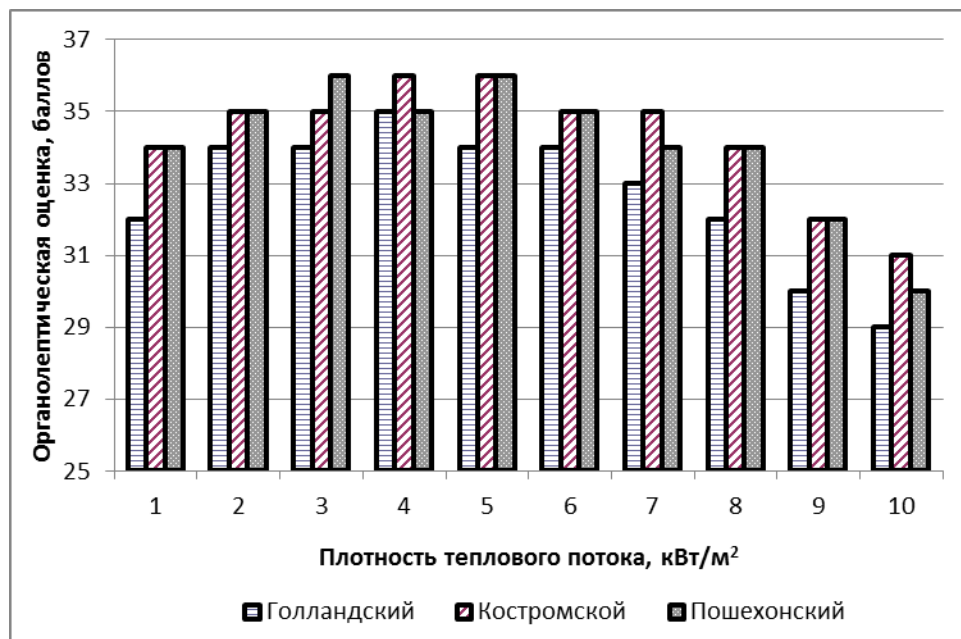


Рисунок 3.18 – Зависимость органолептической оценки сухих полутвердых сыров при подборе установленной плотности теплового потока

Наиболее высокая органолептическая оценка в 34-36 баллов из 40 наблюдалась при тепловой нагрузке в 3-6 кВт/м². Уменьшение плотности теплового потока влечет за собой снижение органолептических показателей из-за увеличения продолжительности сушки. Сушка при установленной плотности теплового потока более 6 кВт/м² из-за относительно большой скорости нагрева характеризуется ухудшением органолептических характеристик, что выражается в подгорании наружной поверхности сыров и неравномерного влагосодержания по объему продукта.

Таким образом, исходя из результатов исследования рациональная величина тепловой нагрузки составляет 6 кВт/м². Сушка при указанном режиме обеспечивает высокие органолептические показатели при относительно небольших энергозатратах и продолжительности сушки, которая составляет 245-285 для различных исследуемых сыров.

3.2.4 Толщина слоя сушки

На следующем этапе производили подбор толщины слоя вакуумной сушки полутвердых сыров и исследование его влияния на эффективность процесса в целом.

Экспериментальные исследования проводили при подобранных ранее температуре нагрева в 50° С, остаточном давлении 3-4 кПа и тепловой нагрузке 6 кВт/м². Сыр нарезался кубиками, толщина слоя сушки в различных экспериментах составляла 5, 10, 15 и 20 мм.

Графики зависимости продолжительности обезвоживания и суммарной органолептической оценки сухих сыров приведена на рис. 3.19.

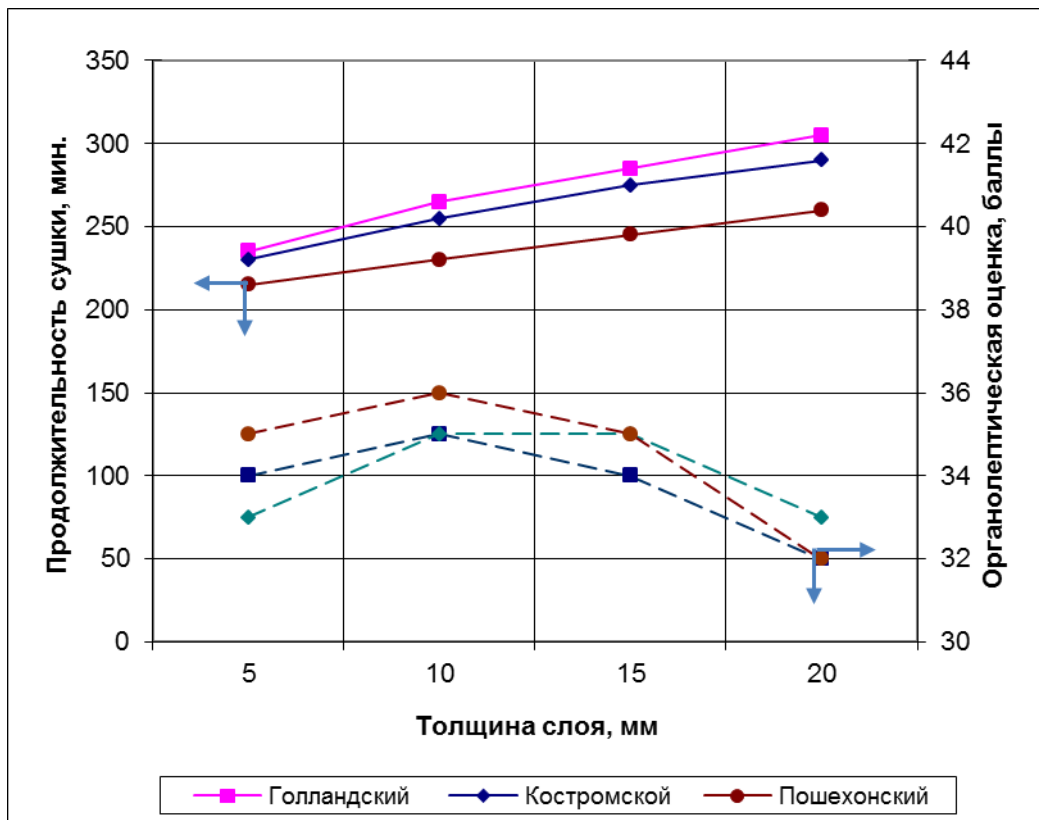


Рисунок 3.19 – Графики зависимости продолжительности вакуумной сушки сыров (сплошные линии) и органолептической оценки сухого продукта (штриховые линии) от толщины слоя сушки

Как и следовало ожидать чем меньше толщина слоя сушки, тем быстрее осуществляется удаление влаги, поскольку продукт прогревается быстрее и расстояние от центра до наружной поверхности продукта меньше. При толщине слоя сушки в 5 мм продолжительность процесса была равна 215-235 мин для различных сыров. Увеличение толщины слоя продукта до 10 мм обуславливает увеличение времени сушки на 8-12%. Наибольшая продолжительность сушки сыров наблюдалась при наибольшей исследуемой толщине слоя в 20 мм и составила 260-305 мин.

Качественные показатели сыров были наибольшими при толщине слоя в 10 мм, что видно из графика на рис. 3.19. При меньшей толщине слоя (5 мм) органолептическая оценка снижалась незначительно – на 1-2 балла, что вероятнее всего вызвано большей степенью вытапливания жира и изменением формы кусочков. При большей толщине слоя наблюдается большой темпера-

турный градиент по объему продукта, а также более худшие условия для перемещения влаги из центра к периферии продукта, что снижало его качество.

Результаты анализа содержания влаги и жира в сухих сырах после вакуумной сушки приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6 – Содержание влаги и жира в полутвердых сырах после вакуумной сушки при подборе толщины слоя

| Марка сыра | Толщина слоя сушки, мм | | | |
|-------------------------------------|------------------------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Содержание жира в сухом веществе, % | | | | |
| Голландский | 42,5 | 43,4 | 43,8 | 44,0 |
| Костромской | 41,9 | 42,6 | 43,1 | 43,7 |
| Пошехонский | 39,1 | 39,7 | 40,4 | 40,9 |
| Содержание влаги, % | | | | |
| Голландский | 4,8 | 5,0 | 5,3 | 5,5 |
| Костромской | 4,9 | 4,9 | 5,2 | 5,4 |
| Пошехонский | 4,8 | 5,1 | 5,4 | 5,5 |

Было обнаружено, что чем меньше толщина слоя сушки, тем лучше происходит удаление влаги из продукта и меньше конечное влагосодержание. При этом также наблюдается меньшее содержание жиров, что обусловлено более интенсивным вытапливанием жира при сушке: меньше расстояния необходимо преодолеть жировым глобулам при движении от центра к периферии продукта.

Исходя из представленных результатов рекомендуемая толщина слоя сушки полутвердых сыров составляет 10 мм. При такой толщине слоя продукта обеспечиваются высокие органолептические показатели (35-36 баллов из 40) и относительно невысокая продолжительность процесса удаления влаги (230-265 мин).

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

3.3.1. Сушка при различной длине волны

В процессе инфракрасной сушки происходит преобразование лучистой энергии от инфракрасной лампы в теплоту. При этом процессы тепло-массопереноса осуществляются не только в окружающей среде, но и внутри самого продукта. Особенностью инфракрасных лучей является их способность проникать на определенную глубину в толщу материала. Глубина проникновения зависит от длины волны, оптических свойств тела и других факторов. Проникающие инфракрасные лучи влияют на молекулярную структуру вещества, а также на перемещение молекул газа в нем [35].

Учеными [35] было обнаружено, что при уменьшении содержания влаги происходит снижение отражающей способности тела, что в свою очередь влияет на интенсивность прогрева инфракрасными лучами. Из этого следует, что при сушке рекомендуется снижать температуру инфракрасных ламп по мере удаления влаги.

Полутвердые сыры относятся к коллоидным капиллярно-пористым телам. В таких продуктах важным фактором становится поглощательная и пропускательная способность периферийных слоев. Между указанными параметрами имеется обратная зависимость – при увеличении пропускательной способности уменьшается поглощательная способность и наоборот.

Чем больше пропускательная способность поверхностных слоев, тем быстрее осуществляется прогрев продукта по объему. При этом увеличение длины волны влечет за собой уменьшение пропускательной способности воды. Например, при длине волны 0,8 мкм пропускательная способность воды составляет порядка 80%. Увеличение длины волны до 1,0 мкм обуславливает уменьшение пропускательной способности воды до 60%, а при длине волны

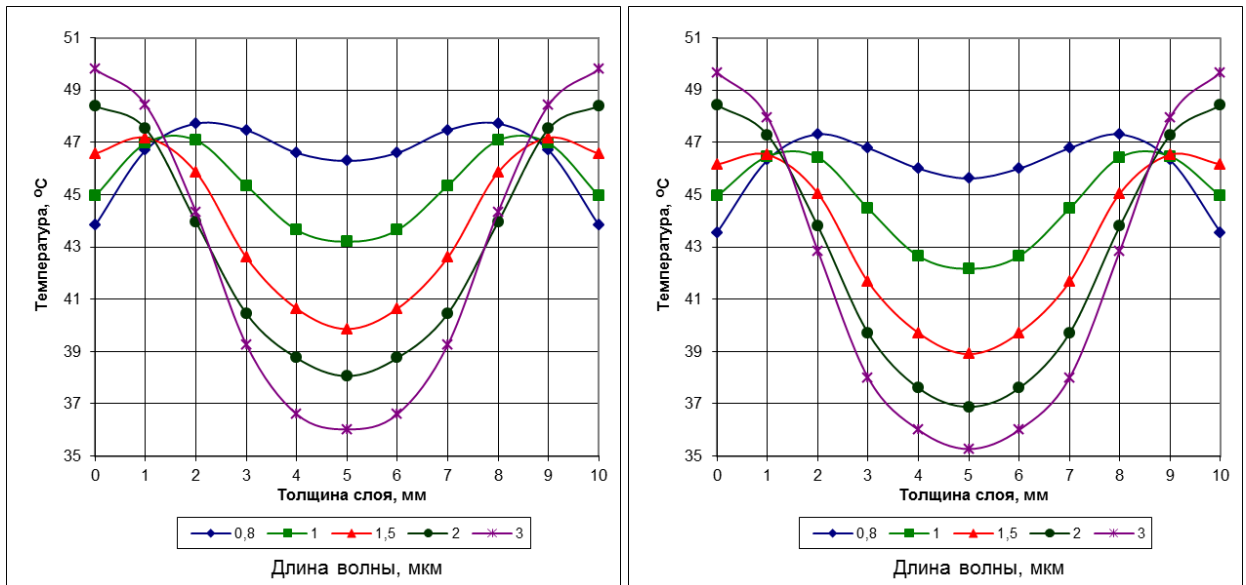
свыше 1,3 мкм указанная характеристика стремится к нулю в то время как поглотительная способность воды стремится к своему максимуму.

Таким образом, анализ влияния длины волны инфракрасного излучения является актуальной задачей при разработке технологических параметров сушки пищевого сырья.

Проводили эксперименты по вакуумному обезвоживанию полутвердых сыров при подобранных ранее температуре сушки в 50° С, остаточном давлении в 3-4 кПа, тепловой нагрузке в 6 кВт/м² и толщине слоя сушки в 10 мм. Длину волны в различных опытах устанавливали от 0,8 до 3 мкм путем изменения модели сушильных ламп излучателей и величины накала.

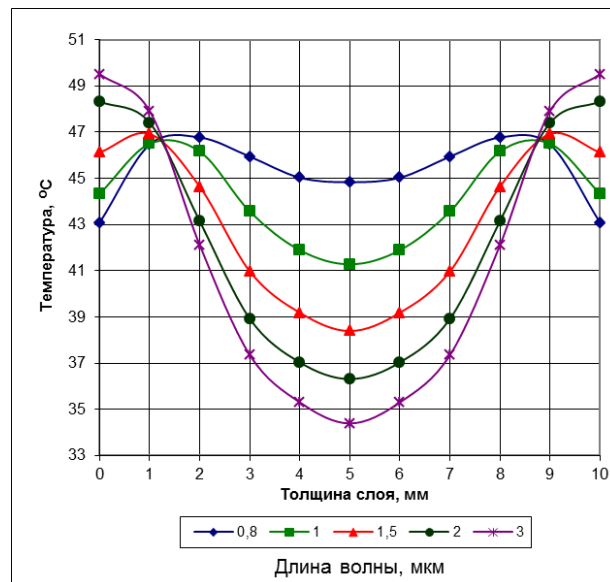
Графики температуры в толще продукта на различной глубине при подборе длине волны излучения через 90 мин. после начала процесса сушки приведены на рис. 3.20.

Мощность излучения сушильных ламп регулируется по показаниям термопары, установленной в камере сушки. Это дает возможность избежать перегрева поверхности продукта как было бы в случае, если бы мощность излучения регулировалась по температуре в толще продукта. Таким образом, когда температура в камере достигает установленного значения, то происходит снижение мощности излучения лампы, а температура на поверхности продукта достигает нужного значения через несколько минут после этого. Однако при этом центральная часть продукта прогревается дольше (рис. 3.20), так как при увеличении толщины слоя происходит повышение поглотительной способности и снижение пропускательной способности вещества.



а

б



в

Рисунок 3.20 – Графики температуры при вакуумной сушке сыров «Голландский» (а), «Костромской» (б) и «Посехонский» (в) на различной толщине продукта при подборе длины волны излучателя

Установлено, что при повышении длины волны излучения увеличивается также разность температур между внутренней частью и наружными слоями продукта. Наименьшая температура наблюдалась в самом центре кусочков сыров, в данном случае на глубине 5 мм, и составляла около 35-45 °С при различной длине волны. По мере продвижения от центра к периферии про-

дукта наблюдается увеличение температуры, наибольшее значение которой приходилось на глубину слоя 1-2 мм при длине волны 0,8-1 мкм.

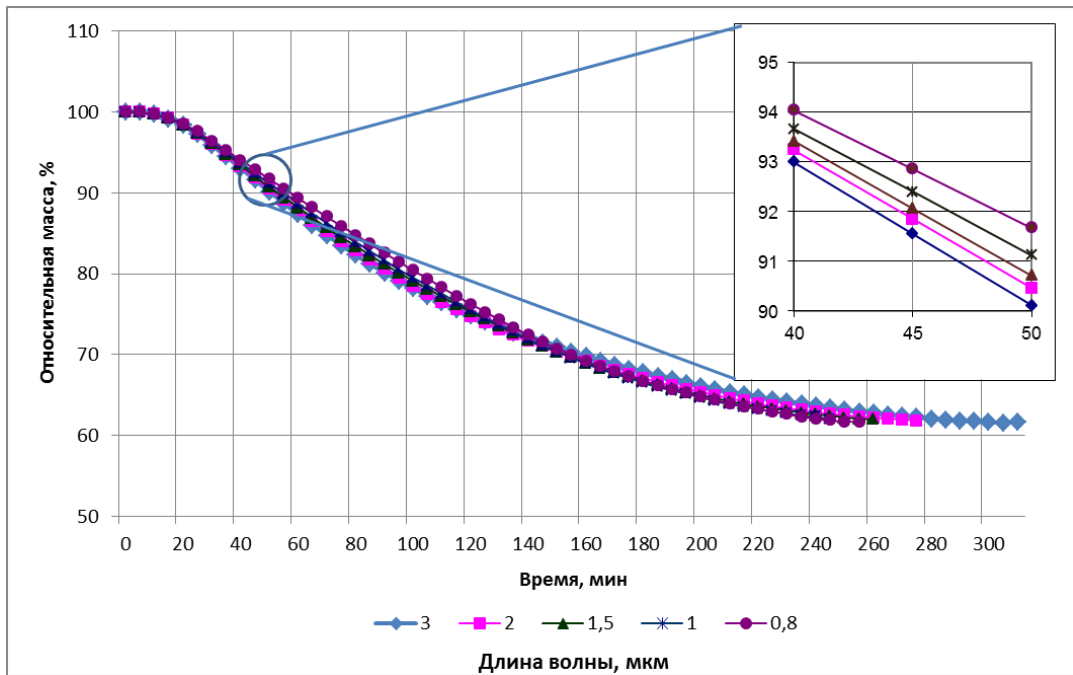
При увеличении длины волны излучения происходит смещение значения глубины слоя, которое соответствует наибольшей температуре. Например, при длине волны 3 мкм наибольшая температура наблюдалась на поверхности продукта. Более низкая температура на поверхности сыров вызвана активным испарением влаги в окружающую среду при вакуумной сушке. 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 (табл. 3.7). Однако с дальнейшим повышением длины волны продолжительность сушки увеличивается ввиду вышеуказанных причин.

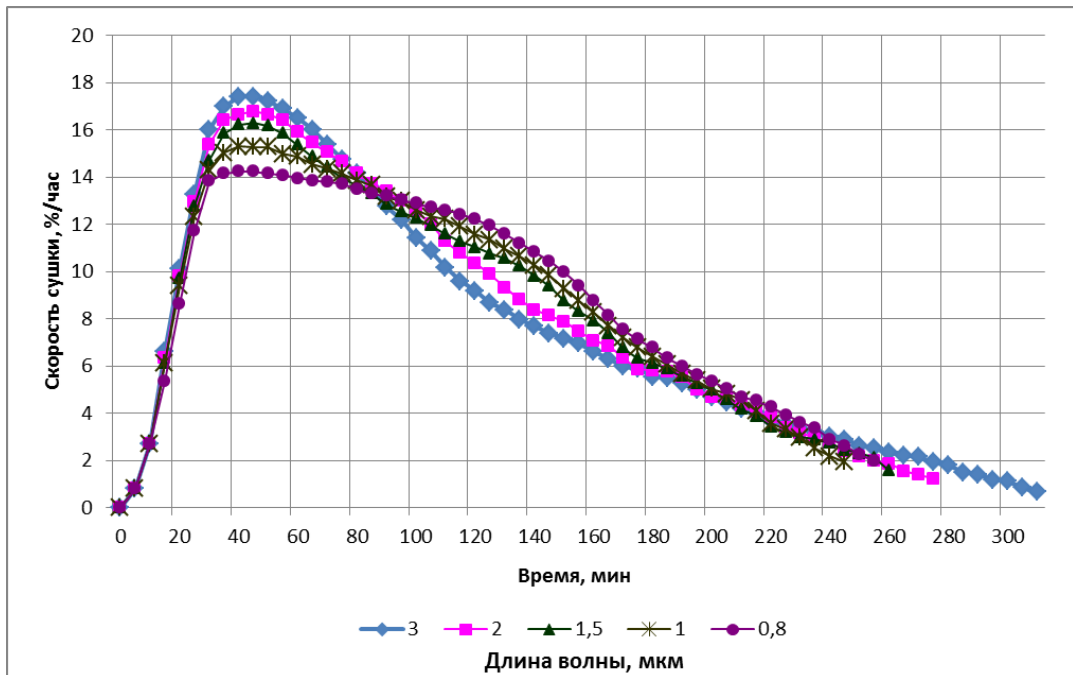
Таблица 3.7 - Продолжительность обезвоживания полутвердых сыров при подборе длине волны излучения, мин.

| 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 |

Отдельный интерес представляет собой кинетика процесса сушки при различной длине волны излучения. Графики зависимости относительной массы и скорости изменения относительной массы сыра «Костромской» от продолжительности сушки приведены на рис. 3.21.



а



б

Рисунок 3.21 – Графики зависимости относительной массы (а) и скорости изменения относительной массы (б) от продолжительности вакуумной сушки сыра «Костромской»

В начале процесса сушки наблюдается заметный рост скорости обезвоживания, наибольшие значения которой (порядка 14-17 %/час при различной длине волны) наблюдаются спустя 30-40 мин после начала сушки. В указан-

ный промежуток времени в случае большей длины волны излучения скорость сушки больше, поскольку поверхность продукта прогревается более интенсивно. Однако спустя 90-100 мин после начала сушки при большей длине волны излучения, когда влага на периферии испарилась, происходит формирование сухой корочки, которая препятствует перемещению влаги из центральной части к поверхности, что снижает скорость удаления влаги. Сказывается также менее интенсивный прогрев внутренних слоев сыра. Спустя 200-220 мин после начала сушки скорость удаления влаги становится примерно одинаковой.

3.3.2. Сушка в нестационарном поле излучения

Рассмотрим далее процессы, происходящие при вакуумной сушке если в ходе обезвоживания изменять длину волны излучателя. Для проведения экспериментов использовали три вида сушильных ламп, размещенных в верхней части камеры. На первом этапе сушки будет работать первый вид ламп с длиной волны 3 мкм, на втором этапе данные лампы отключаются и включается второй вид ламп с длиной волны излучения 1,5 мкм, на третьем этапе на смену им приходят лампы с длиной волны 0,8 мкм. Идея состояла в том, что вначале сушки имеет смысл использовать лампы с большей длиной волны излучения, что будет способствовать интенсивному прогреву поверхности продукта, после чего использовать ИК-лампы с меньшей длиной волны для более глубокого прогрева продукта и удаления влаги из всего объема.

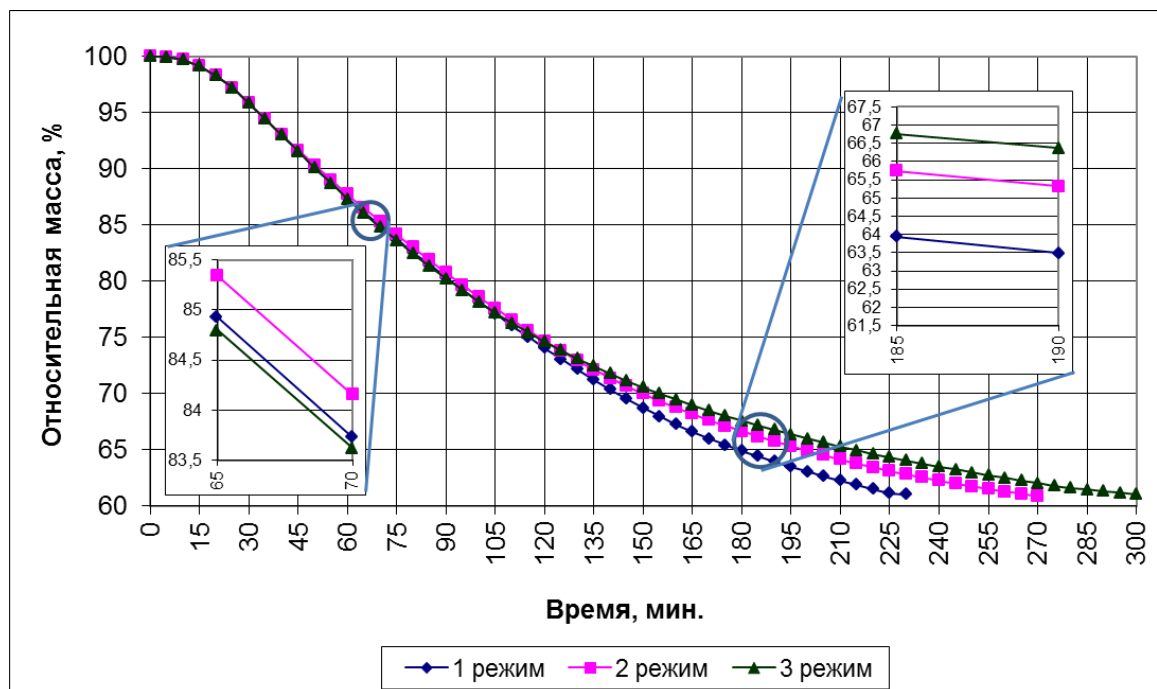
В табл. 3.8 представлены параметры режимов, которые использовались в данной серии опытов. Всего было использовано три режима, которые характеризовались разной продолжительностью каждого из этапов. Графики зависимости относительной массы от продолжительности сушки сыра «Костромской» при использовании указанных режимов приведены на рис. 3.22.

Таблица 3.8 – Параметры режимов многоступенчатой вакуумной сушки полутвердых сыров

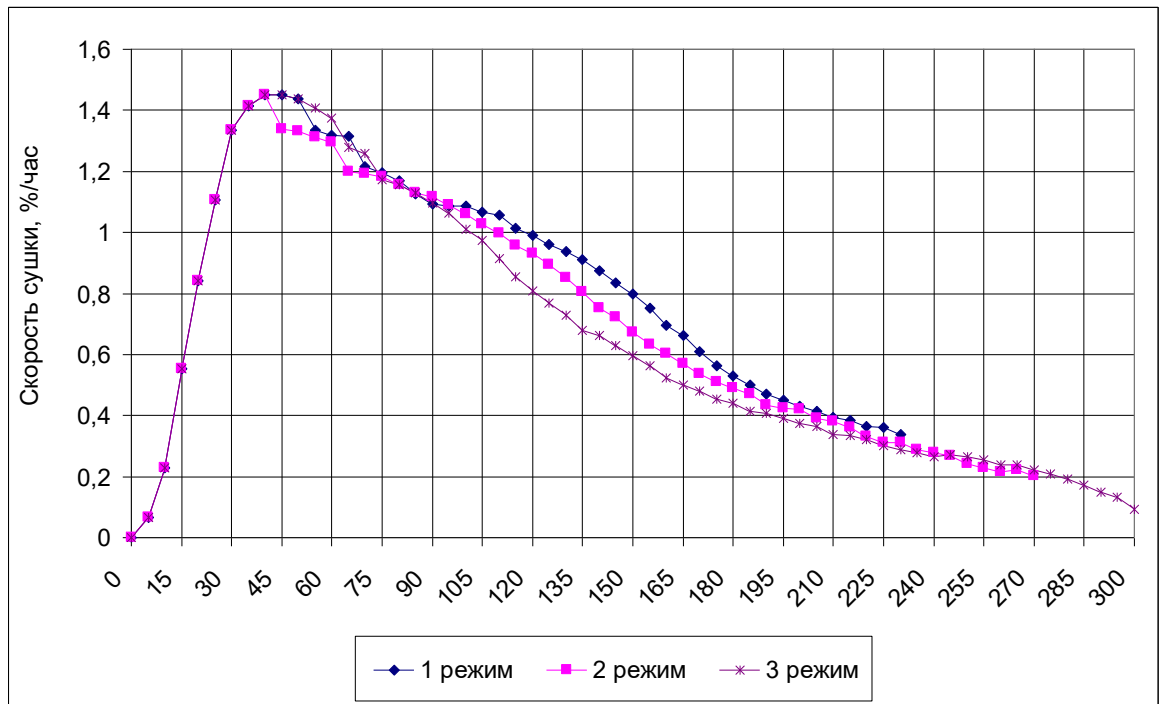
| Номер режима | Длительность этапов, мин. | | |
|--------------|---------------------------|--------|---------------|
| | 1 этап | 2 этап | 3 этап |
| 1 | 40 | 20 | до завершения |
| 2 | 50 | 15 | до завершения |
| 3 | 60 | 10 | до завершения |

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.



а



б

Рисунок 3.22 – Графики изменения относительной массы (а) и скорости изменения относительной массы (б) в процессе ступенчатой вакуумной сушки сыра «Костромской»

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. Время сушки всех видов исследованных сыров приведено на рис. 3.23.

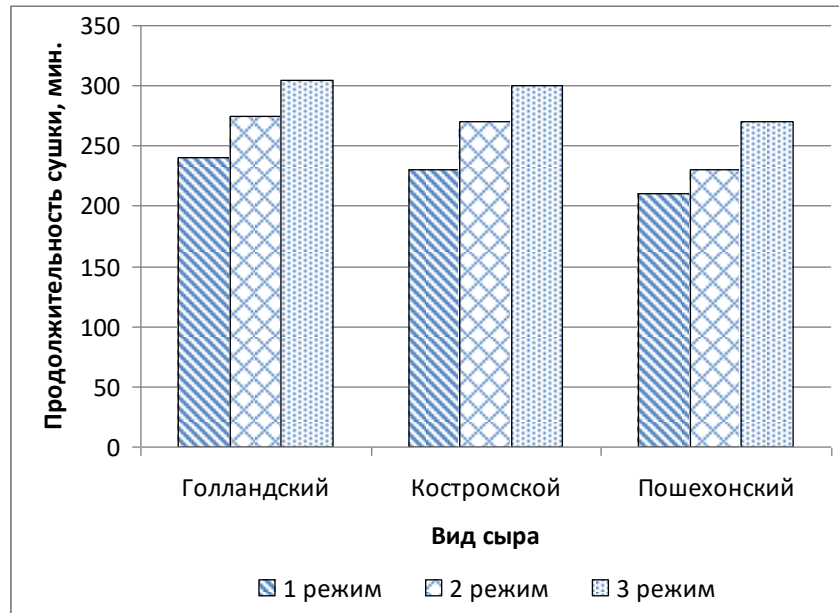


Рисунок 3.23 – Продолжительность вакуумного многоступенчатого обезвоживания сыров

Для сыров «Голландский» и «Посехонский» наблюдалась схожая зависимость продолжительности сушки от используемых режимов. Наименьшая продолжительность сушки была при первом режиме и для сыров «Посехонский» и «Голландский» составила 210 и 240 мин соответственно, что на 10% меньше, чем при использовании обычного стационарного режима сушки при постоянной длине волны 0,8 мм.

Результаты органолептической оценки обезвоженных полутвердых сыров представлены в табл. 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты органолептической оценки сыров, полученных трехступенчатой вакуумной сушкой

| Номер режима | Голландский | Костромской | Пошехонский |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 35 | 35 | 36 |
| 2 | 35 | 34 | 35 |
| 3 | 34 | 33 | 35 |

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 (рис. 3.19 и табл. 3.9).

Таким образом, исходя из результатов исследований рекомендуется обезвоживать сыры методом указанной трехступенчатой вакуумной сушки с продолжительностью первого этапа 40 мин., второго этапа - 20 мин.

3.3.3. Влияние пространственного расположения излучателей

Далее осуществляли подбор расстояния между инфракрасной лампой и поддоном с продуктом. Для этого проводили экспериментальные исследования по вакуумной сушке при подобранных ранее режимах. Расстояние между ИК-лампой и лотком с продуктом в различных опытах составляло 10, 15, 20, 25 и 30 см. Ранее был выбран трехступенчатый способ сушки, в котором используются три группы ламп, поэтому чтобы обеспечить равномерное распределение теплового потока от ламп к продукту использовалась следующая схема размещения ИК-ламп (рис. 3.24).

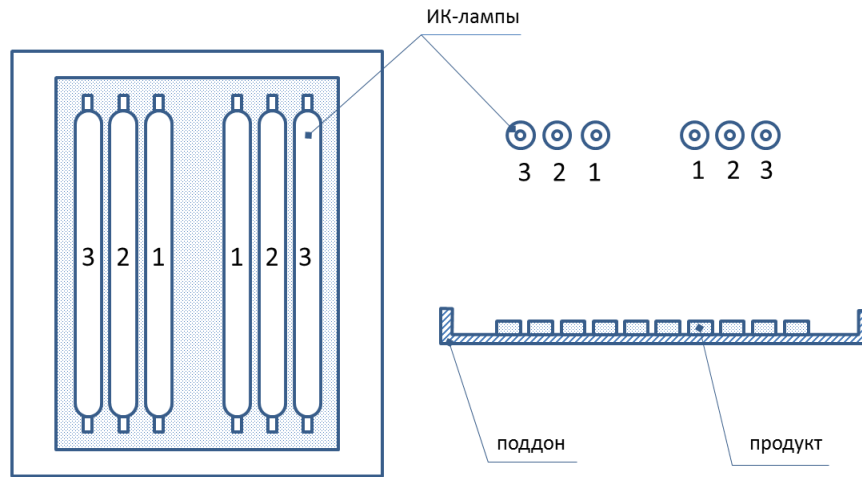


Рисунок 3.24 – Схема размещения ИК-ламп в сушильной камере

Органолептическую оценку сухих сыров осуществляли по той же методике, что и раньше. При этом анализу подвергали кусочки продукта, находящиеся на одной линии, перпендикулярной осям ИК-ламп. Для формирования общей органолептической оценки отбор проб осуществлялся по пяти таким линиям и за конечное значение принималось среднее арифметическое от всех замеров. Средний балл органолептической оценки для сыра «Голландский» при различном расстоянии от ИК-ламп до поддона приведен на рис. 3.25.

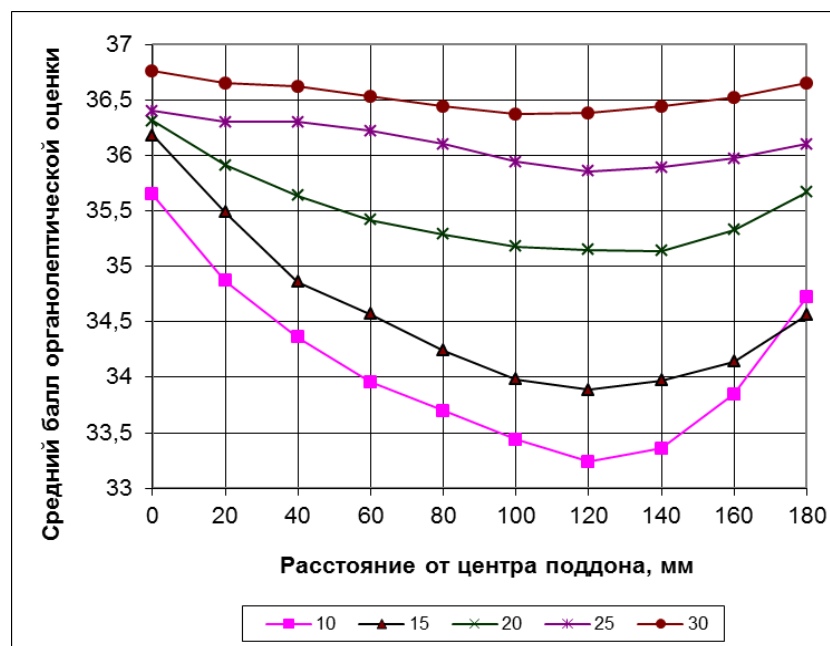


Рисунок 3.25 – Средний балл органолептической оценки сухого сыра «Голландский» при различном расположении ИК-ламп

Представленные данные свидетельствуют о том, что наилучшее качество сыра наблюдается при наибольшем расстоянии от ИК-ламп до поддона с продуктом – 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. Это подтверждается результатами анализа влагосодержания, которые приведены на рис. 3.26.

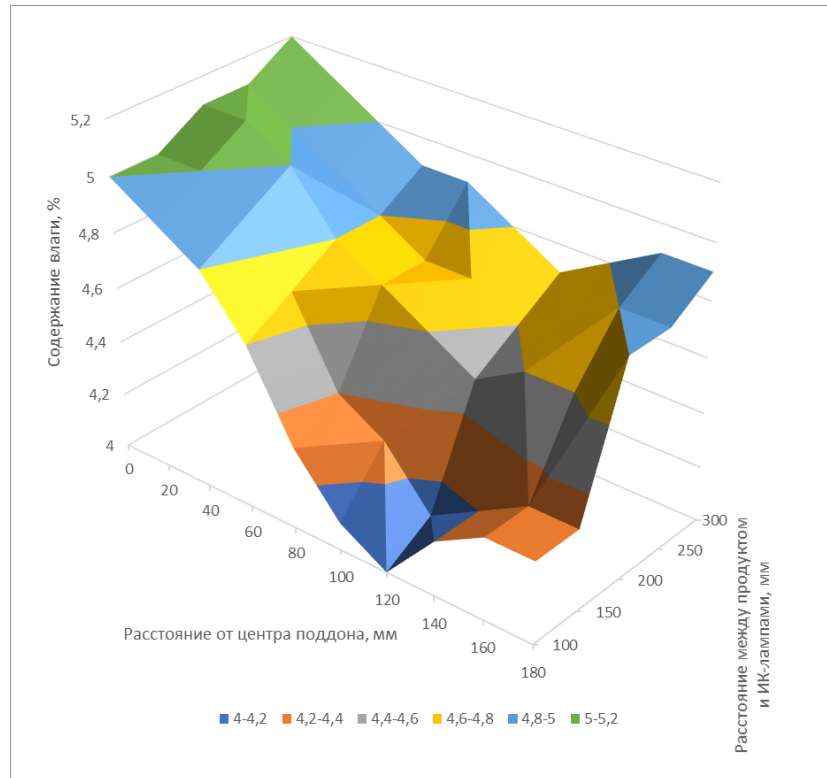
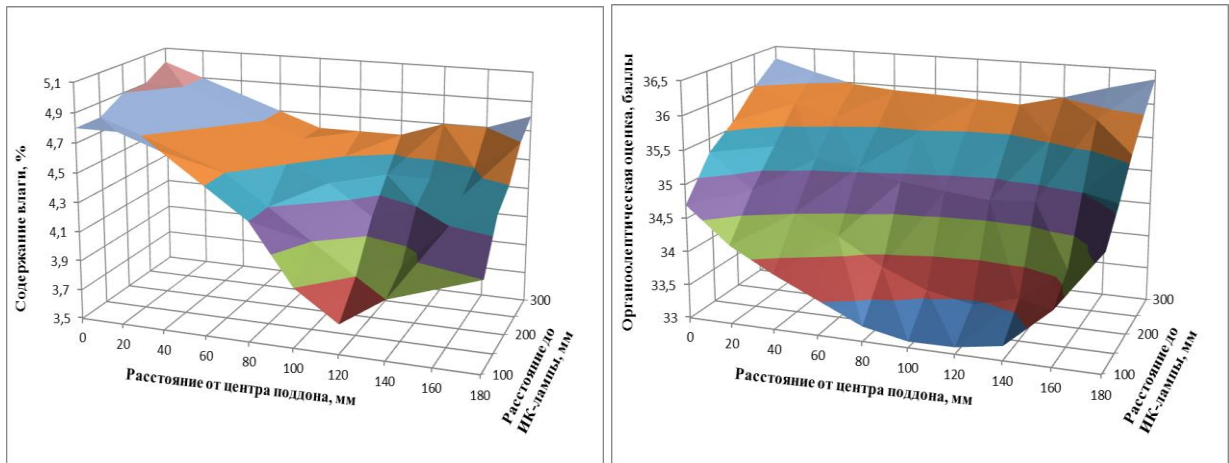


Рисунок 3.26 - Содержание влаги в сухом сыре «Голландский» на различных участках поддона, %

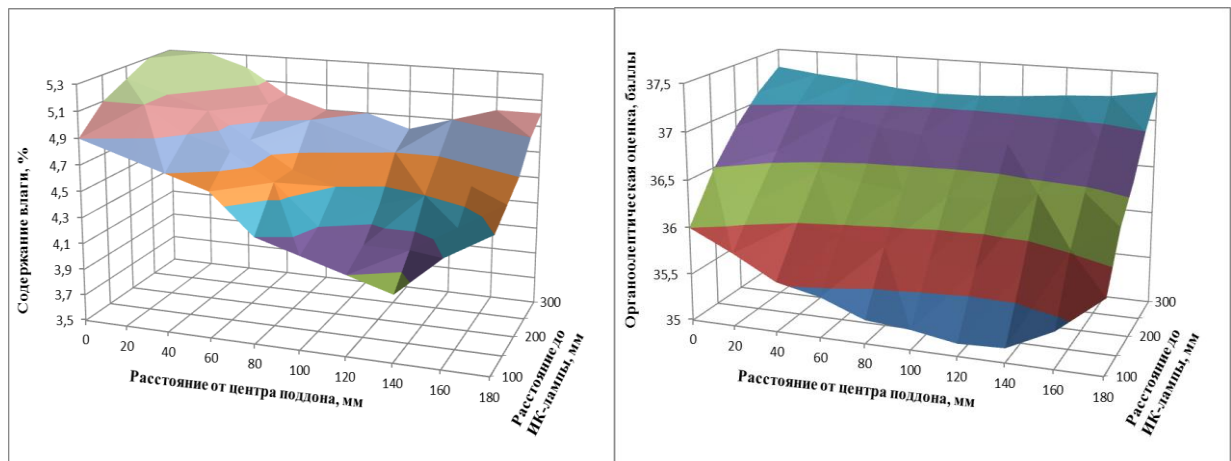
Обнаружено, что наихудшее качество продукта наблюдается у тех кусочков, которые были расположены непосредственно возле третьей группы ламп, осуществляющих сушку большую часть времени - на расстоянии 120÷140 мм от центра поддона. Это особенно проявляется при расстоянии между ИК-лампами и поддоном с продуктом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

расстоянии 120 мм от центра поддона обладали наименьшими органолептическими показателями – общий балл составил 33,2 из 40.

Аналогичный анализ был проведен для остальных видов исследуемых сыров. Результаты приведены в виде графиков поверхностей на рис. 3.27.



«Костромской»



«Пошехонский»

а

б

Рисунок 3.27 – Графики зависимости содержания влаги (а) и органолептической оценки (б) обезвоженных полутвердых сыров от расстояния между поддоном и сушильной лампой при различном расположении на поддоне

Наилучшее качество остальных исследуемых сыров наблюдалось также в центре поддона и на его краях при наибольшем расстоянии от ИК-ламп до лотка с продуктом: органолептическая оценка сыров «Пошехонский» и «Ко-

стромской» составила 37,3 и 36,4 баллов из 40. Динамика органолептических показателей при изменении расположения ИК-ламп аналогична динамике влагосодержания, что можно наблюдать на рис. 3.27. Наименьшее влагосодержание и наихудшее качество продукта также наблюдались при расстоянии 120 см от центра поддона.

При изменении расстояния между ИК-лампой и поддоном с продуктом меняются также теплотери в окружающую среду. Чтобы исследовать этот фактор был также проведен анализ энергозатрат, результаты которого приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10 – Удельные энергозатраты при вакуумной сушке полутвердых сыров, кВт/кг влаги

| Вид сыра | Расстояние между продуктом и ИК-лампами, мм | | | | |
|-------------|---|------|------|------|------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| Голландский | 1,83 | 2,10 | 2,40 | 2,49 | 2,58 |
| Костромской | 1,82 | 2,06 | 2,29 | 2,34 | 2,53 |
| Пошехонский | 1,75 | 1,95 | 2,13 | 2,27 | 2,38 |

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%.

Исходя из результатов исследований рекомендуемое расстояние между поддоном с продуктом и сушильной лампой составляет 200 мм. Указанное расстояние обеспечивает относительно равномерный прогрев продукта по всей площади лотка, высокое качество сухого сыра, невысокие удельные энергозатраты, составляющие 2,13-2,40 кВт/кг влаги.

3.4 Качественные характеристики сыров вакуумной сушки

3.4.1. Усадочные явления в процессе вакуумной сушки

В большинстве случаев при удалении влаги из продукта наблюдается его усадка. Существенная усадка происходит, например, при конвективном обезвоживании продуктов с высоким влагосодержанием, например таких как овощи, фрукты, ягоды, плоды и т.д. У большинства продуктов при этом усадка наблюдается на протяжении всей сушки.

Для исследования данного явления в ходе вакуумного обезвоживания образцы кусочков сыра, лежащие на специальной масштабной сетке, фотографировались и отправлялись на обработку специальной программой. Подобные замеры проводились в пятикратной повторности. Графики зависимости линейного размера полутвердых сыров от влагосодержания приведены на рис. 3.28а, а графики зависимости коэффициента усадки от влагосодержания сыров – на рис. 3.28 б. Коэффициент усадки рассчитывался путем деления текущей длины кусочка на первоначальную длину до сушки.

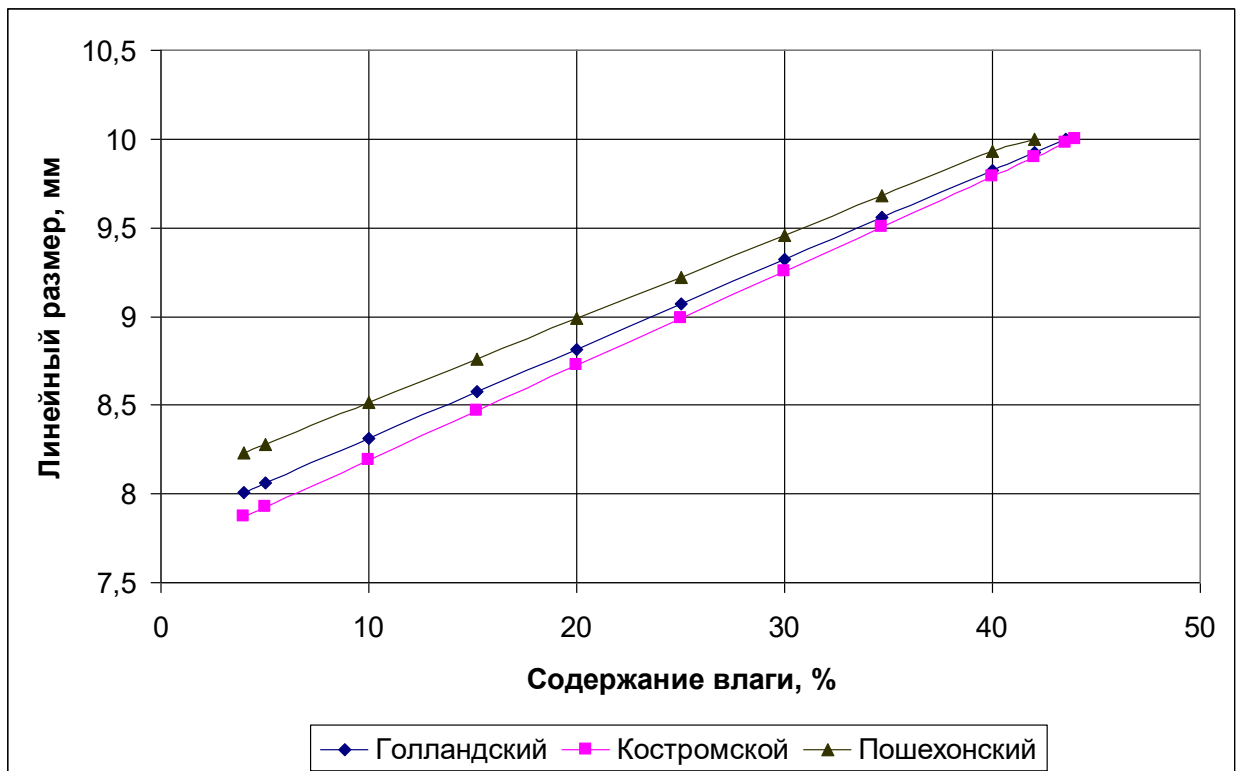
Были получены следующие линейные уравнения, позволяющие определить линейную усадку сыров от содержания влаги:

$$\text{- для сыра «Голландский»}: \delta = -0,504U + 21,9 ; \quad (3.5)$$

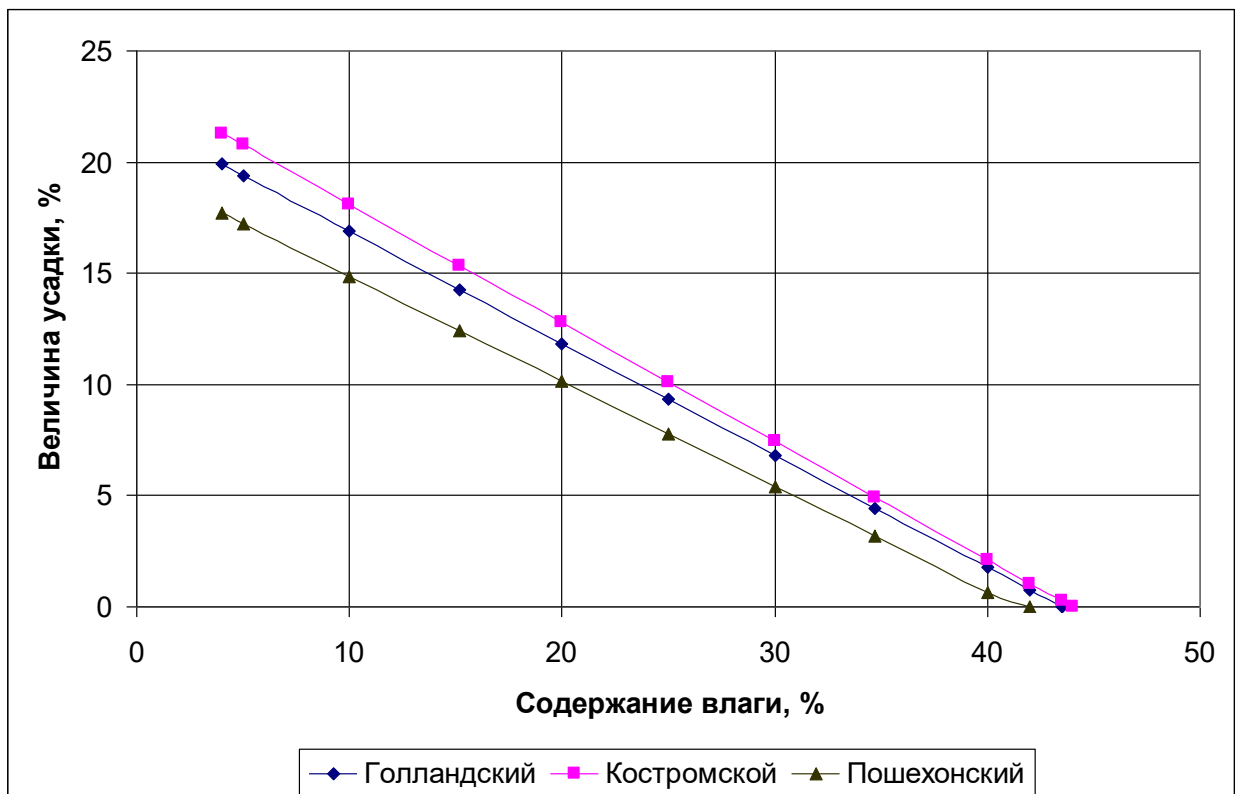
$$\text{- для сыра «Костромской»}: \delta = -0,533U + 23,43 ; \quad (3.6)$$

$$\text{- для сыра «Пошехонский»}: \delta = -0,47U + 19,55 , \quad (3.7)$$

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



а



б

Рисунок 3.28 – Графики зависимости длины образцов (а) и величины усадки (б) полутвердых сыров в процессе вакуумной сушки

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%.

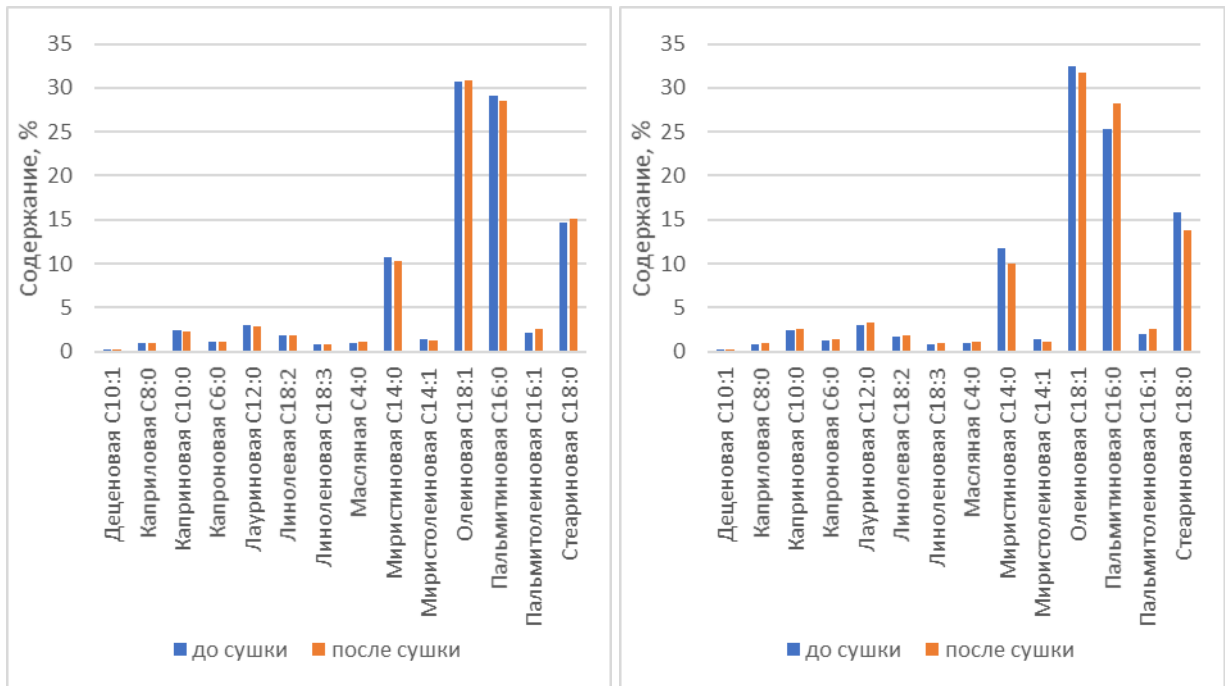
3.4.2 Состав органических и жирных кислот

На запах и вкус сыров активное влияние оказывают свободные летучие жирные кислоты. При этом вкус и запах определяются наличием тех или иных компонентов, а также их количественным соотношением. На указанные органолептические характеристики наиболее сильно влияют низкомолекулярные жирные кислоты – например такие как уксусная, каприловая, масляная, капроновая и т.д.

Был проведен анализ состава жирных кислот в исследуемых сырах, результаты представлены на рис. 3.29.

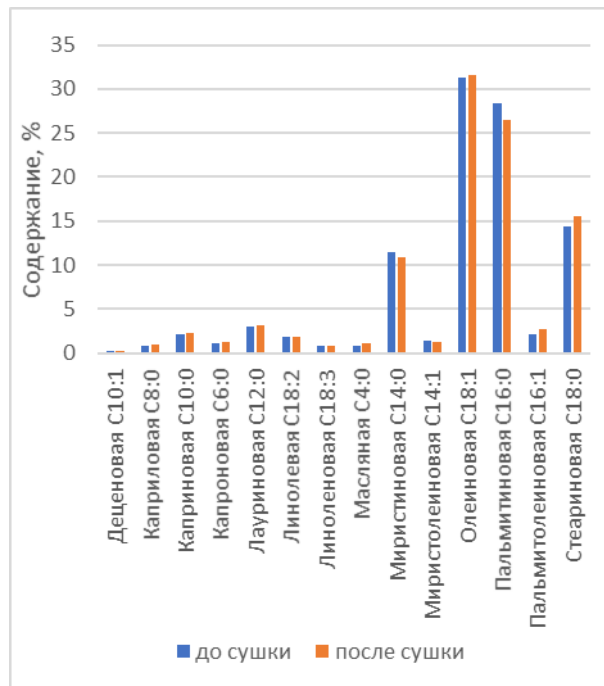
В исследованных сырах по содержанию выделялись такие кислоты как пальмитиновая (25,3-29,1%) и олеиновая (30,6-32,5%). Также относительно высоким содержанием характеризовались стеариновая (13,7-15,5%) и миристиновая (10,0-11,7%) кислоты. Из незаменимых кислот стоит также отметить линоленовую и линолевую.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

Содержащиеся в сырах органические кислоты не влияют на энергетическую ценность, однако оказывают существенное влияние на органолептические показатели продукта. Кроме того, они влияют на обмен веществ в организме.



а

б



в

Рисунок 3.29 – Содержание определенных жирных кислот в полутвердых сырах «Голландский» (а), «Костромской» (б) и «Пошехонский» (в) к общему содержанию жирных кислот

Количественное содержание органических кислот в полутвердых сырах до и после обезвоживания приведено в табл. 3.11.

Таблица 3.11 – 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 | - | - | - |

В сырах до сушки наибольшим содержанием характеризовалась молочная кислота – ее массовая доля составила $18905,59 \div 23702,41$ 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 «Пошехонский», «Костромской» и «Голландский» соответственно. В сухих сырах не было обнаружено муравьиной кислоты.

3.4.3 Витаминный состав

При удалении влаги происходит повышение концентрации сухих веществ, а также ряд физико-химических преобразований, оказывающих влияние на витаминный состав продукта.

Концентрация витаминов в полутвердых сырах до и после обезвоживания приведена в табл. 3.12.

Таблица 3.12 – 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.

3.4.4 Электрофоретическое исследование белкового компонента

Проводили исследования белкового состава сыров до и после сушки. Вначале определяли содержание общего белка, результаты представлены в табл. 3.13.

Таблица 3.13 – Содержание белка в сырах до и после сушки, %

| Вид сыра | До сушки | После сушки |
|-------------|----------|-------------|
| Голландский | 23,86 | 28,54 |
| Костромской | 25,89 | 33,14 |
| Пошехонский | 26,12 | 32,87 |

Нативные сыры характеризовались схожим содержанием белка – 23,9-26,1%. После вакуумного обезвоживания содержание белка повысилось, однако ввиду температурного воздействия произошла частичная денатурация белка, что объясняет заниженные значения данной характеристики. После сушки содержание белка составило 28,5-32,9%.

Далее проводили анализ фракционного состава белков по методу Лэмли. Для разделения белка использовался денатурирующий полиакриламидный гель с 0,1 % SDS-Na. Электрофорез проводился на однократном электродном буфере с добавлением при 15 мА. Результаты электрофоретического исследования представлены в табл. 3.14.

В нативных сырах был определен ряд фракций казеина с молекулярной массой порядка 26,5÷32 кДа, лактоферрин и β -лактоглобулин с молекулярными массами 79÷80 и 24,5 кДа соответственно, а также минорные фракции белков с молекулярной массой 16÷18 кДа. По содержанию наиболее всего выделялись такие белки как α 1-казеин, β -казеин и лактоферрин.

Сушка не оказала существенного влияния на такие фракции как α 2-казеин и κ -казеин – содержание данных белков менялось не более чем на 2%. Также незначительно менялась концентрация β -казеина: не более чем на 2% для сыров «Пошехонский» и «Голландский» и не более чем на 4% для сыра «Костромской». При этом наблюдалась заметная потеря β -лактоглобулина у сыра «Голландский» - концентрация указанного белка понизилась в 1,5 раза после вакуумной сушки. Концентрация почти всех белков минорной фракции снизилась на 1,2-6,6%. Белковые потери обусловлены частичной тепловой денатурацией. При этом наиболее термостабильным оказался лактоферрин.

Таблица 3.14 – Результаты электрофоретического анализа белков сыра

| Наименование белка | До сушки | | | | | | После сушки | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|-------------|-------------|---------------------------------------|-------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------|---------------------------------------|-------------|-------------|
| | Молекулярная масса, кДа | | | Массовая доля от обще- го белка, % | | | Молекулярная масса, кДа | | | Массовая доля от обще- го белка, % | | |
| | Голландский | Костромской | Попехонский | Голландский | Костромской | Попехонский | Голландский | Костромской | Попехонский | Голландский | Костромской | Попехонский |
| Лактоферрин | 79,63 | 79,70 | 79,88 | 4,44 | 15,22 | 18,12 | 78,72 | 79,11 | 79,24 | 8,09 | 18,87 | 22,85 |
| α s1-казеин | 31,88 | 31,85 | 31,84 | 16,24 | 12,64 | 15,65 | 31,98 | 31,98 | 32,04 | 26,07 | 16,08 | 22,69 |
| α s2-казеин | 30,46 | 30,51 | 30,51 | 7,44 | 9,57 | 2,08 | 30,31 | 30,33 | 30,41 | 7,69 | 11,12 | 2,67 |
| β -казеин | 28,46 | 28,31 | 28,46 | 27,41 | 22,86 | 17,60 | 28,04 | 27,99 | 28,05 | 25,95 | 19,16 | 16,47 |
| κ -казеин | 26,72 | 26,67 | 26,77 | 6,84 | 3,23 | 12,07 | 26,53 | 26,57 | 26,52 | 7,13 | 3,01 | 11,29 |
| β -лакто- глобулин | 24,33 | 24,34 | 24,32 | 9,00 | 9,10 | 5,23 | 24,51 | 24,54 | 24,44 | 5,97 | 8,32 | 4,27 |
| Другие белки | 17,97 | 17,94 | 17,96 | 10,98 | 10,86 | 12,83 | 17,81 | 17,85 | 17,87 | 9,12 | 9,12 | 9,92 |
| | 16,77 | 16,81 | 16,85 | 8,86 | 8,90 | 7,80 | 16,86 | 16,78 | 16,82 | 4,70 | 8,03 | 7,78 |
| | 16,02 | 16,01 | 16,02 | 8,79 | 7,62 | 8,62 | 16,07 | 15,94 | 16,05 | 5,29 | 6,29 | 2,08 |

3.4.5 Аминокислотный состав

Знания об аминокислотном составе позволяют дополнить картину биологической ценности продукта. Аминокислоты принадлежат к органическим соединениям и необходимы для нормального функционирования организма. Они участвуют в синтезе витаминов, гормонов, пигментов и других веществ. Около 10 аминокислот незаменимы – это означает, что они не синтезируются в организме человека и поступают с пищей. Аминокислоты содержатся во многих белковых продуктах, они активно применяются в спортивном питании и фармацевтике.

Результаты анализа аминокислот в полутвердых сырах до и после сушки приведены в табл. 3.15.

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.

Таблица 3.15 – Содержание аминокислот сыров, мг/100 г

| Наименование аминокислоты | До сушки | | | После сушки | | |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Голландский | Костромской | Пошехонский | Голландский | Костромской | Пошехонский |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Аланин | 1688 | 1446 | 931 | 1517 | 1408 | 1065 |
| Аргинин | 1940 | 2631 | 2390 | 1768 | 2501 | 2398 |
| Аспарагиновая кислота | 2290 | 2036 | 1369 | 2830 | 2624 | 2217 |
| Гистидин | 2177 | 1304 | 1849 | 2292 | 1667 | 1476 |
| Глицин | 863 | 623 | 473 | 949 | 1029 | 952 |
| Глутаминовая кислота | 2829 | 3596 | 3371 | 3457 | 4583 | 4709 |

Продолжение табл. 3.15.

| | | | | | | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Изолейцин | 756 | 929 | 1446 | 1169 | 1717 | 2234 |
| Лейцин | 1509 | 1714 | 1299 | 2441 | 2995 | 2514 |
| Лизин | 2196 | 1968 | 2834 | 2205 | 2337 | 3095 |
| Метионин | 893 | 762 | 1043 | 1659 | 1314 | 1731 |
| Пролин | 963 | 1509 | 1378 | 789 | 1344 | 926 |
| Серин | 753 | 244 | 651 | 949 | 427 | 453 |
| Тирозин | 1333 | 1822 | 813 | 1570 | 2506 | 1524 |
| Треонин | 870 | 954 | 2125 | 873 | 998 | 1964 |
| Фенилаланин | 1316 | 1781 | 1148 | 1660 | 2447 | 1810 |
| Цистеин | 1227 | 2384 | 2893 | 2036 | 3087 | 3514 |
| Общее содержание аминокислот | 23603 | 25703 | 26013 | 28164 | 32984 | 32582 |

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.

3.5. Анализ микроструктуры сыров

Вакуумная сушка оказывает существенное влияние на реологические характеристики продукта, что проявляется не только на макро-, но и на микроуровне. В ходе сушки наблюдаются изменения в микроструктуре, в том числе в капиллярно-пористом строении, что влияет на органолептические характеристики продукта и структурно-механические показатели. Поэтому анализ микроструктуры вещества до и после сушки является важным исследованием, которое позволяет правильно организовать процесс сушки.

Вначале проводили микроструктурный анализ сыров до сушки. Фотографии микроструктуры, полученные электронно-сканирующим микроско-

пом, приведены на рис. 3.30÷3.32. В фотографиях использовали следующую степень увеличения: 50, 250, 500, 1000, 1500 и 2500 крат.

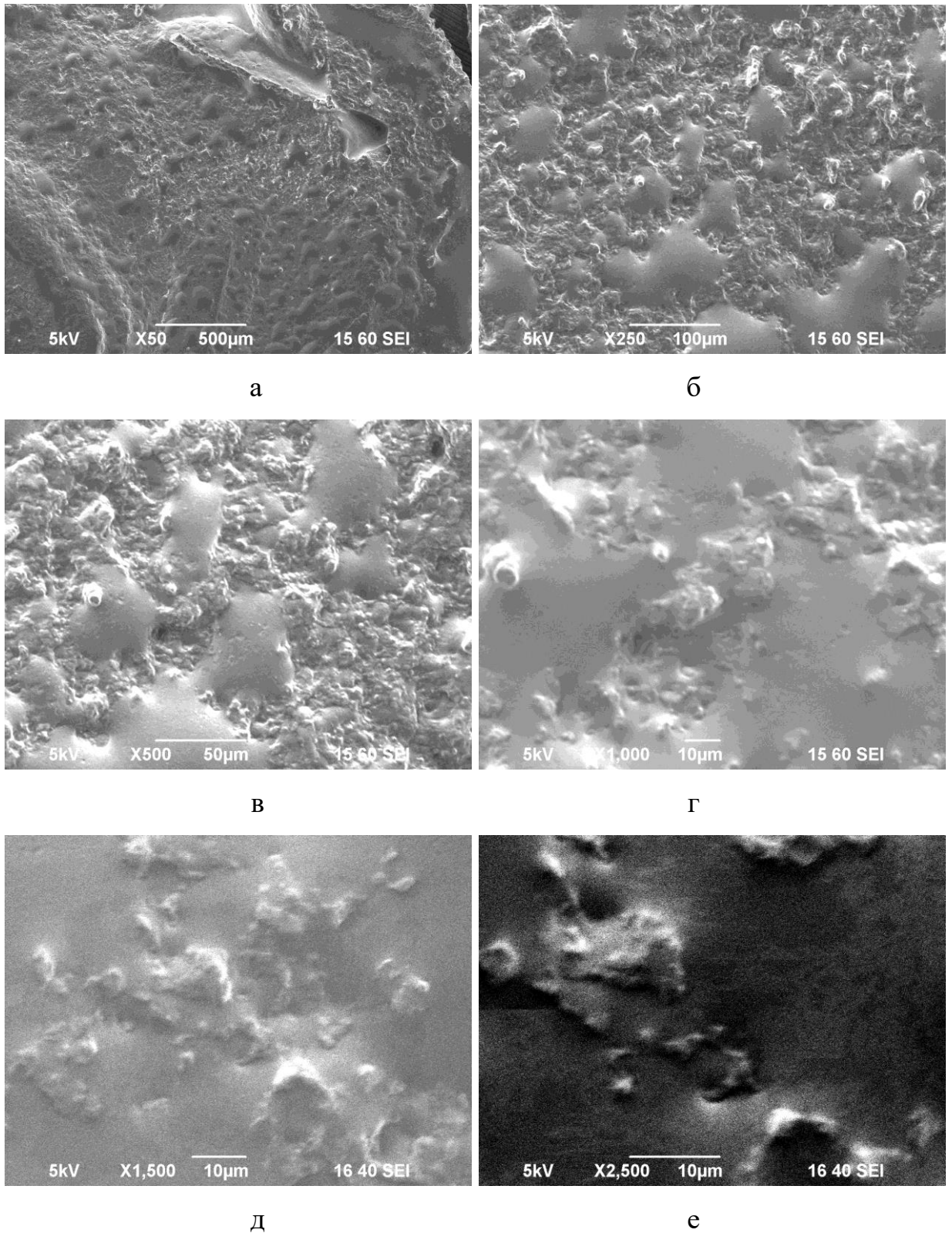
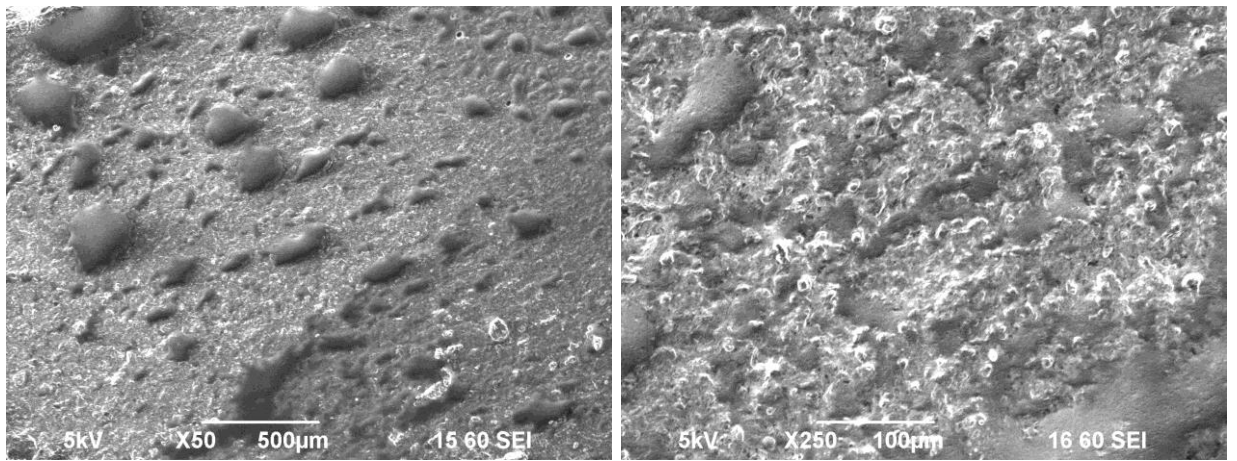


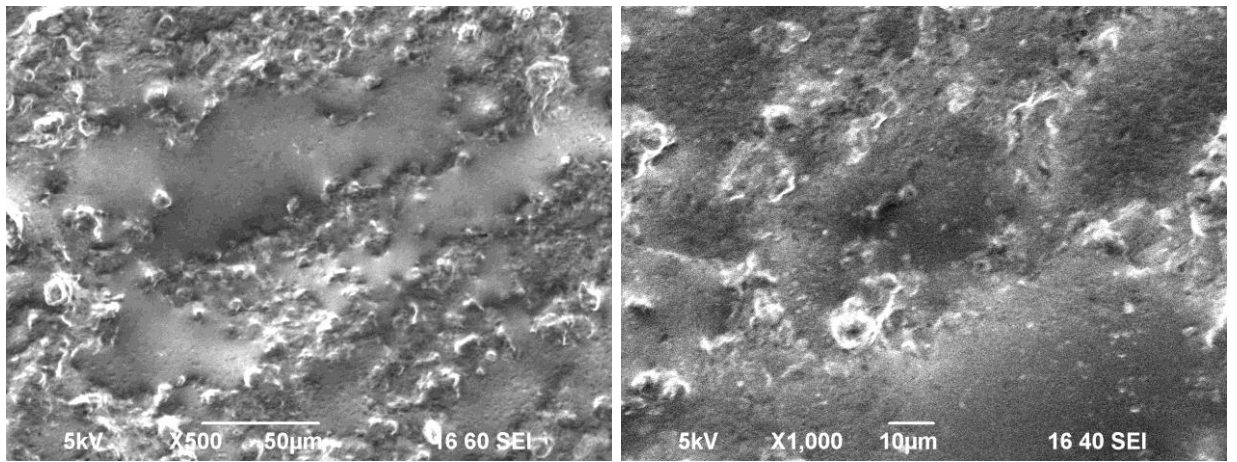
Рисунок 3.30 – Фотографии микроструктуры сыра «Голландский» до сушки при кратности увеличения:

а – 50 раз; б – 250 раз; в – 500 раз; г – 1000 раз; д – 1500 раз; е – 2500 раз



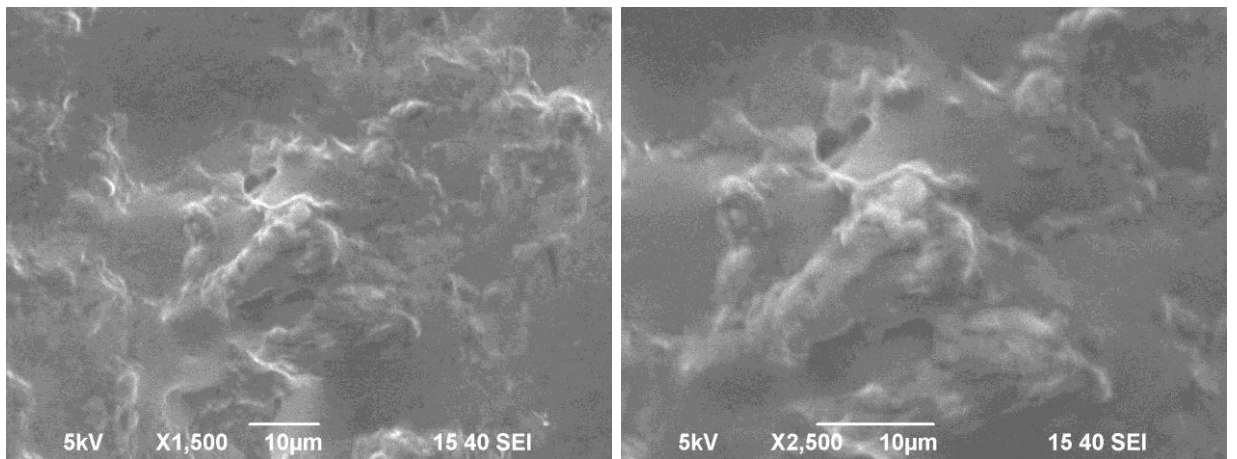
а

б



в

г



д

е

Рисунок 3.31 – Фотографии микроструктуры сыра «Костромской» до сушки при кратности увеличения:

а – 50 раз; б – 250 раз; в – 500 раз; г – 1000 раз; д – 1500 раз; е – 2500 раз

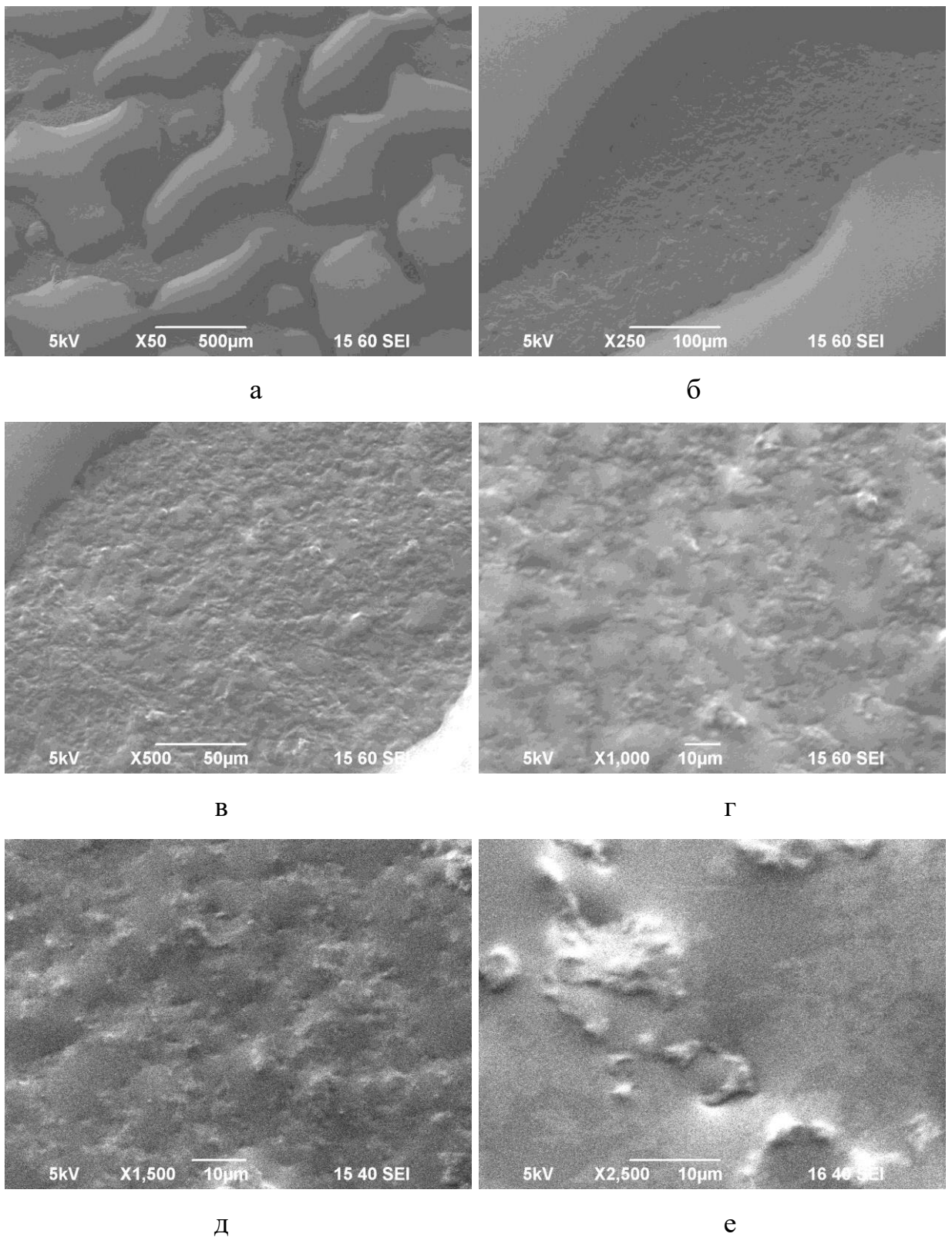


Рисунок 3.32 – Фотографии микроструктуры сыра «Пошехонский» до сушки при кратности увеличения:

а – 50 раз; б – 250 раз; в – 500 раз; г – 1000 раз; д – 1500 раз; е – 2500 раз

Микроструктура сыров включает в себя размеры элементов, входящих в ее состав, и их взаимное расположение. Она предоставляет информацию о правильности биохимических процессов, которые происходят при производстве данного продукта. Каждая марка сыра обладает своей микроструктурой, однако в целом содержание и пространственное расположение компонентов микроструктуры (жировые глобулы, макрозерна, кристаллы солей кальция и т.д.) во всех полутвердых сырах схожее.

Приведенные фотографии микроструктуры (рис. 3.30÷3.32) свидетельствуют о том, что микроструктура исследуемых сыров включает в себя белковый матрикс, внутри которого равномерно расположены глобулы жира различной формы и размеров. В сыре «Голландский» диаметр жировых глобул составляет в среднем 100-200 мкм. В сыре «Костромской» жировые глобулы имеют больший разброс по диаметру: на фотографиях можно найти как небольшие зерна, диаметром меньше 10 мкм, так и крупные, диаметром до 500 мкм. В сыре «Пошехонский» расположение жировых зерен более структурированное, что можно наблюдать на рис. 3.32а.

При степени увеличения $\times 1000$ можно увидеть кристаллы солей, диаметром менее 5 мкм. Лучше всего указанный компонент выделяется в сыре «Костромской» (рис. 3.31). До сушки поверхность сыров замкнутая, без явно выделенных капилляров, что является признаком достаточно высокого содержания влаги. Микроструктурный анализ позволил установить, что в сыре «Голландский» структура наиболее равномерная.

Фотографии микроструктуры полутвердых сыров после вакуумной сушки приведены на рис. 3.33.

После сушки структура сыров «разворачивается», на фотографиях становятся видны микропоры в сухом матриксе, которые нельзя было увидеть на фотографиях до обезвоживания. После сушки сыра «Голландский», в нем можно увидеть развитую поверхность с равномерно расположенными микропорами, размером около 10 мкм. Жировые включения видны не так хорошо как на фотографиях до сушки.

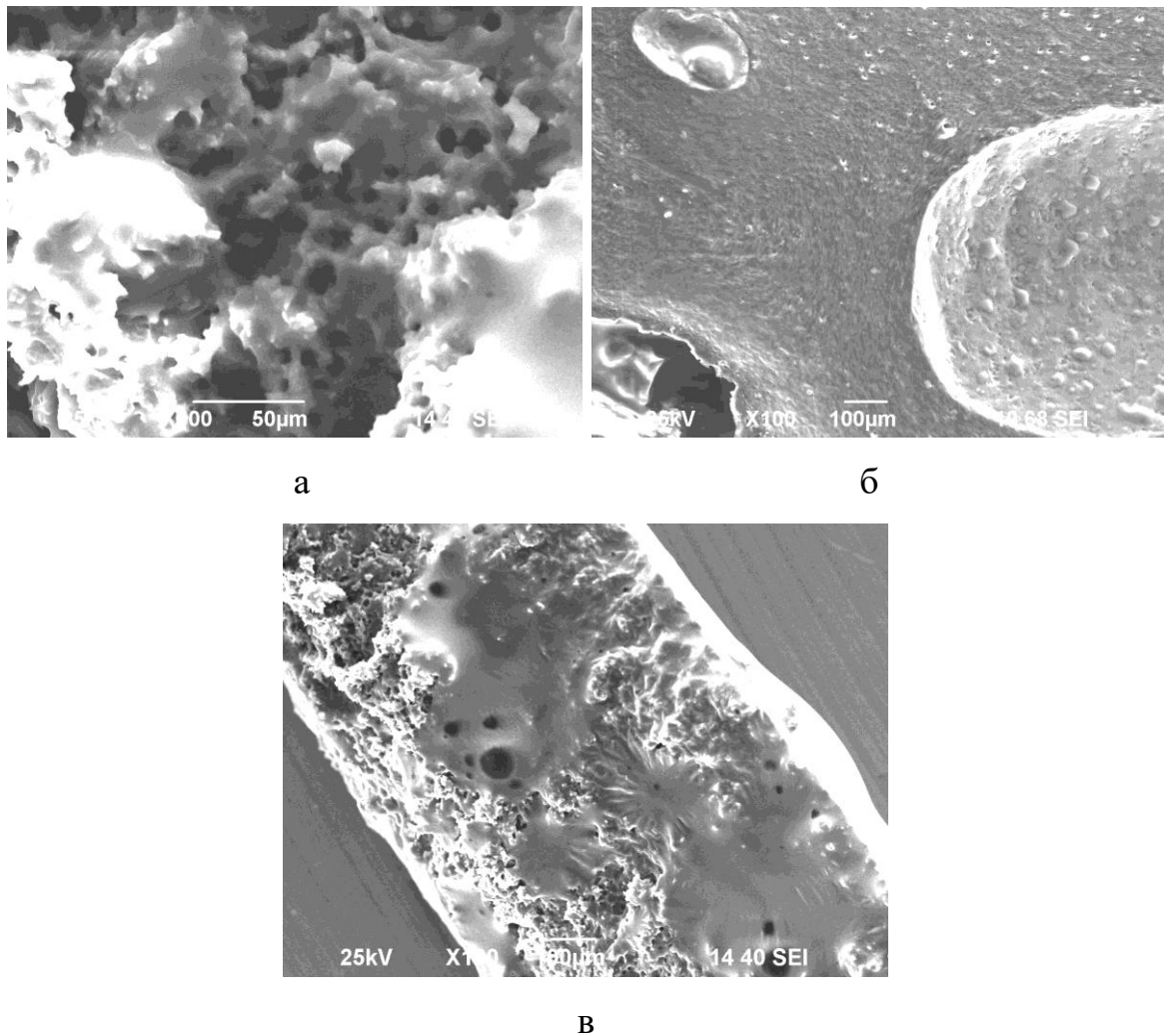


Рисунок 3.33 – Фотографии микроструктуры сыров Голландский (а), Костромской (б) и Пошехонский (в) после вакуумной сушки при кратности увеличения 100 раз

В обезвоженном сыре «Костромской» наблюдается более гладкая поверхность с разломами в некоторых местах. На рис. 3.33б можно наблюдать округлую микропустоту, диаметром свыше 500 мкм, в которой видны жировые глобулы со средним размером 20-90 мкм. В левом углу видна схожая микропустота, размером порядка 250 мкм, с крупным жировым включением.

На фотографиях сыра «Пошехонский» (рис. 3.33в) можно наблюдать трещины и микропоры, текстура данного сыра более мелкодисперсная, чем у сыра «Голландский». После температурного воздействия в ходе сушки жировые глобулы сформировали более крупные образования, которые прослеживаются на фотографиях в виде гладких областей. Диаметр большинства мик-

ропор относительно небольшой и составляет менее 10 мкм. Однако встречаются и достаточно крупные микропоры с размером более 70 мкм.

Таким образом, было проведено исследование микроструктуры полутвердых сыров до и после сушки. Определены размеры компонентов (микропор и жировых включений) и их пространственное расположение, показано влияние вакуумной сушки на микроструктуру сыров. Установлено, что в ходе сушки происходит вытапливание жира и слияние жировых глобул в более крупные образования. Особенно явно это наблюдается при сушке сыра «Пошехонский». Белковый матрикс обезвоженных сыров обладает мелкодисперсной структурой, включающей в себя микропоры, диаметром от нескольких мкм до 100 мкм.

3.6. Исследование сорбционных свойств сыров в процессе хранения

В процессе хранения материала в воздушной атмосфере, в зависимости от соотношения парциального давления пара у поверхности вещества P_B к парциальному давлению пара в окружающей среде P_n , может происходить сорбция и десорбция. Сорбция представляет собой явление поглощения продуктом влаги, десорбция – напротив: испарение влаги из продукта. Указанные процессы происходят до наступления равновесия, когда в материале устанавливается равновесная влажность при данной температуре $\varphi = \frac{P_B}{P_M}$.

Сорбция влажных паров осуществляется в несколько этапов: поглощение влажных паров поверхностью материала, частичное увлажнение продукта за счет поглощенной влаги и образование на поверхности продукта насыщенного раствора, перемещение влаги из поверхности вглубь продукта, установление подвижного равновесного состояния между массовой долей влаги материала и относительной влажностью воздуха.

Из-за различия форм связи влаги и структуры продуктов равновесная влажность определяется только экспериментальным путем за счет построе-

ния изотерм сорбции и десорбции. Для этих целей продукт выдерживают при заданной температуре и влажности в воздушной среде до наступления равновесной влажности.

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.

На рис. 3.34÷3.36 приведены изотермы сорбции полутвердых сыров.

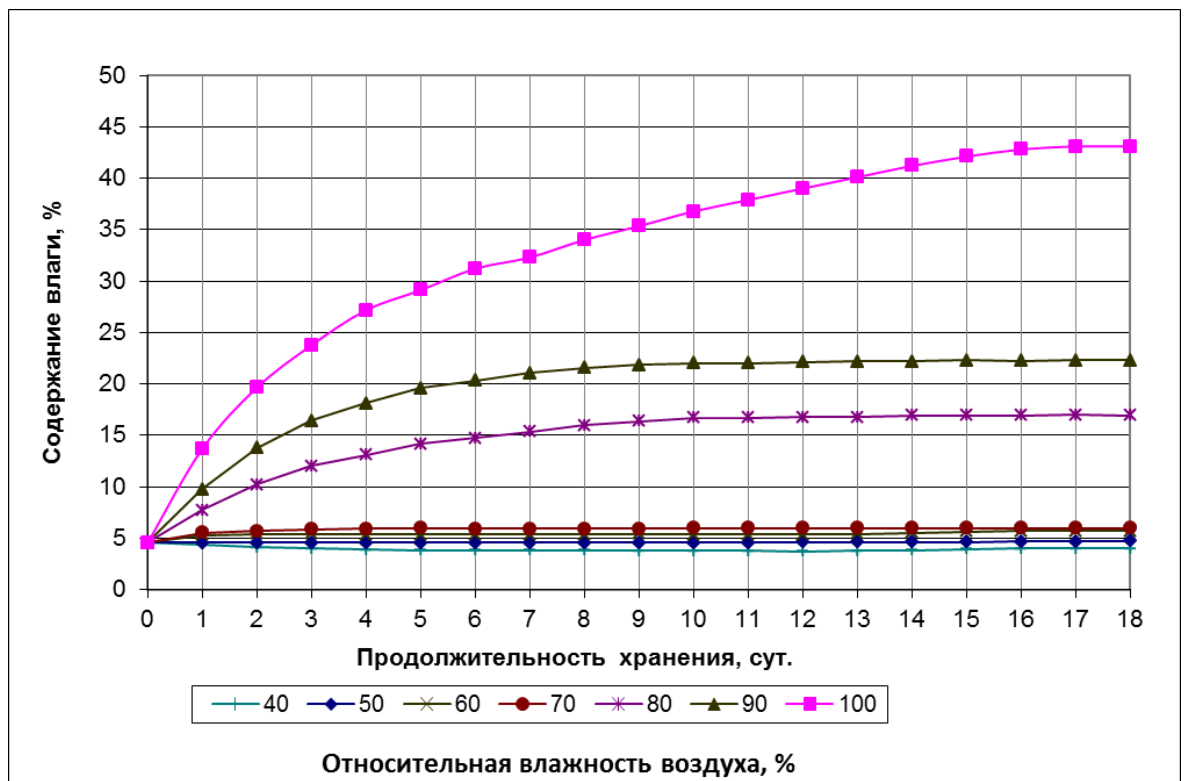


Рисунок 3.34 – Изотермы сорбции сухого сыра «Голландский» при различной относительной влажности воздуха

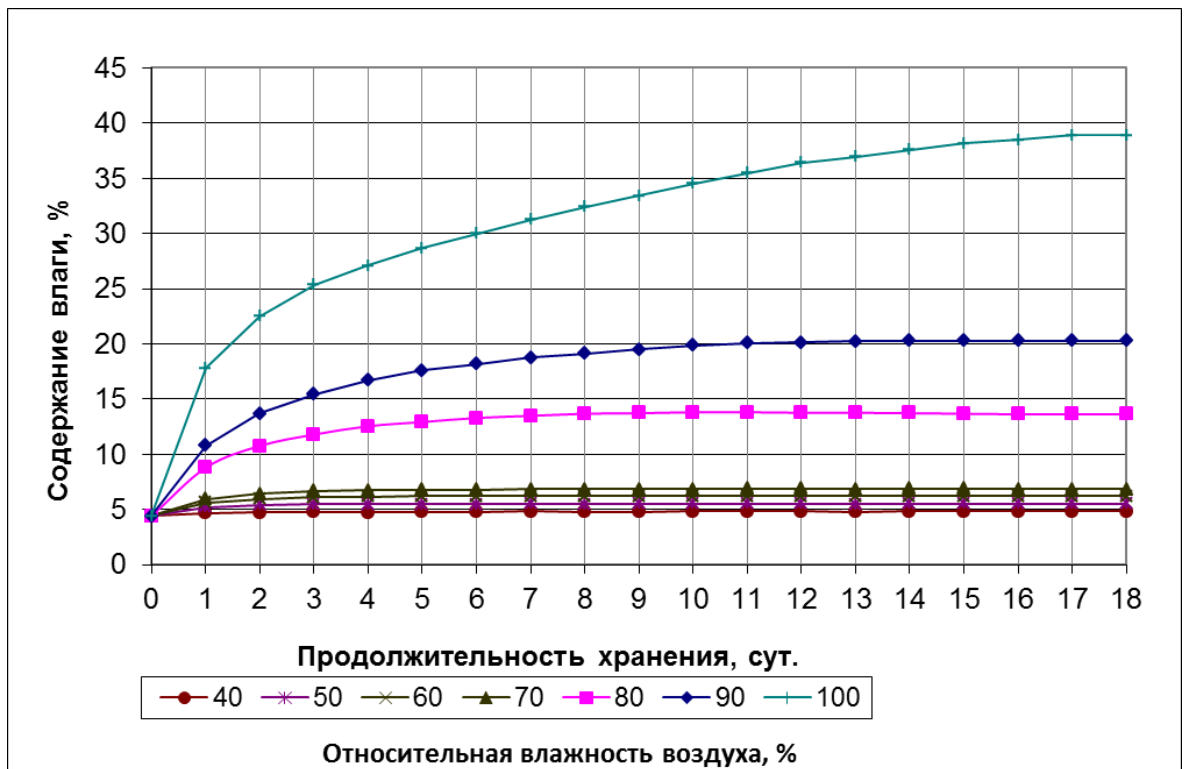


Рисунок 3.35 – Изотермы сорбции сухого сыра «Костромской» при различной относительной влажности воздуха

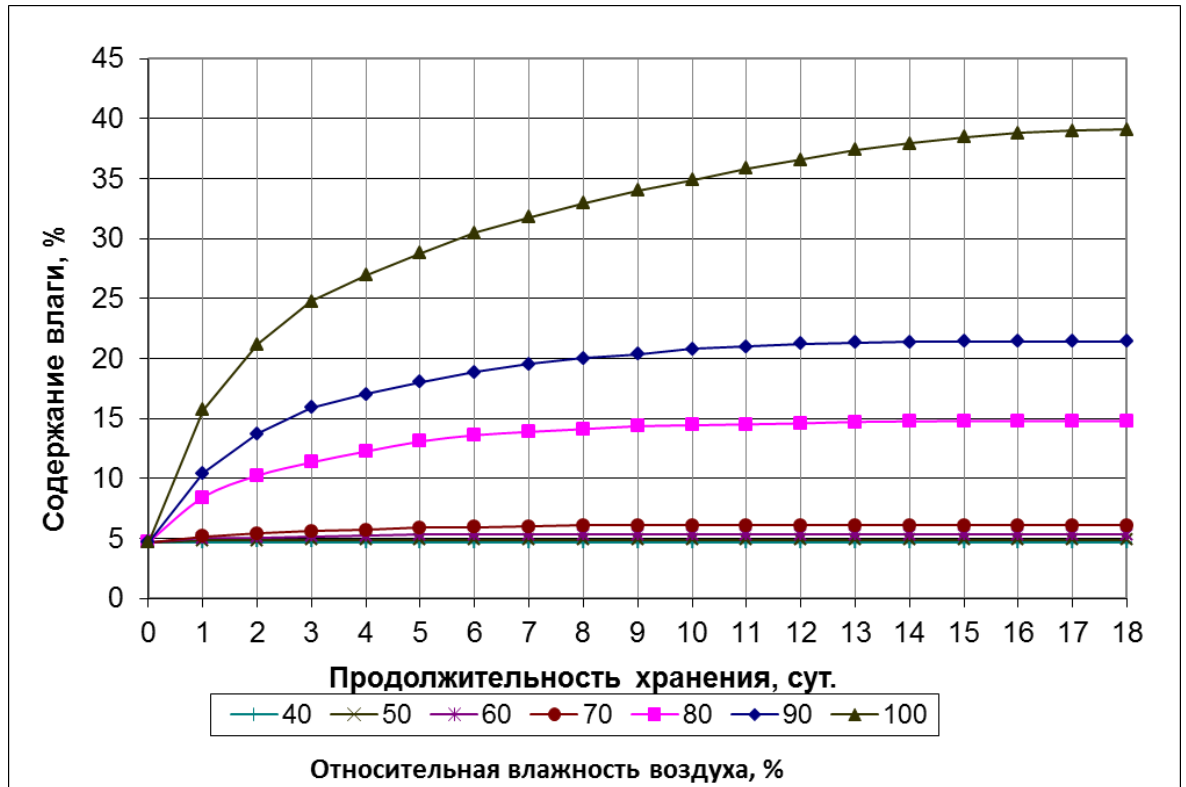


Рисунок 3.36 – Изотермы сорбции сухого сыра «Посехонский» при различной относительной влажности воздуха

Обнаружено, что при относительной влажности воздуха 40-70% состояние равновесной влажности наступает спустя 2-6 суток хранения. Кроме того, было установлено, что при определенных условиях наблюдается десорбция влаги в окружающую среду: например, при хранении сыра «Голландский» в условиях относительной влажности воздуха 40% происходила отдача влаги продуктом в окружающую среду, что выражается в понижении содержания влаги на 0,5% спустя 18 суток хранения. При тех же условиях в сыре «Пошехонский» содержание влаги снизилось лишь на 0,15%.

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.):

$$K_c = \frac{W_c}{C_c}, \quad (3.8)$$

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

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

Был проведен расчет коэффициентов сорбции сухих полутвердых сыров при температуре хранения 20 °С, результаты представлены в табл. 3.16.

В диапазоне относительной влажности воздуха 40...70% коэффициенты сорбции полутвердых сухих сыров составляют 0,04-0,07. При относительной влажности воздуха 100% величина коэффициентов сорбции достигает уже 0,64-0,76. При этом наиболее интенсивная сорбция происходила в сыре «Голландский».

Таблица 3.16- 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 |

Изотермы сорбции и десорбции сухих сыров представлены на рис. 3.37-3.39.

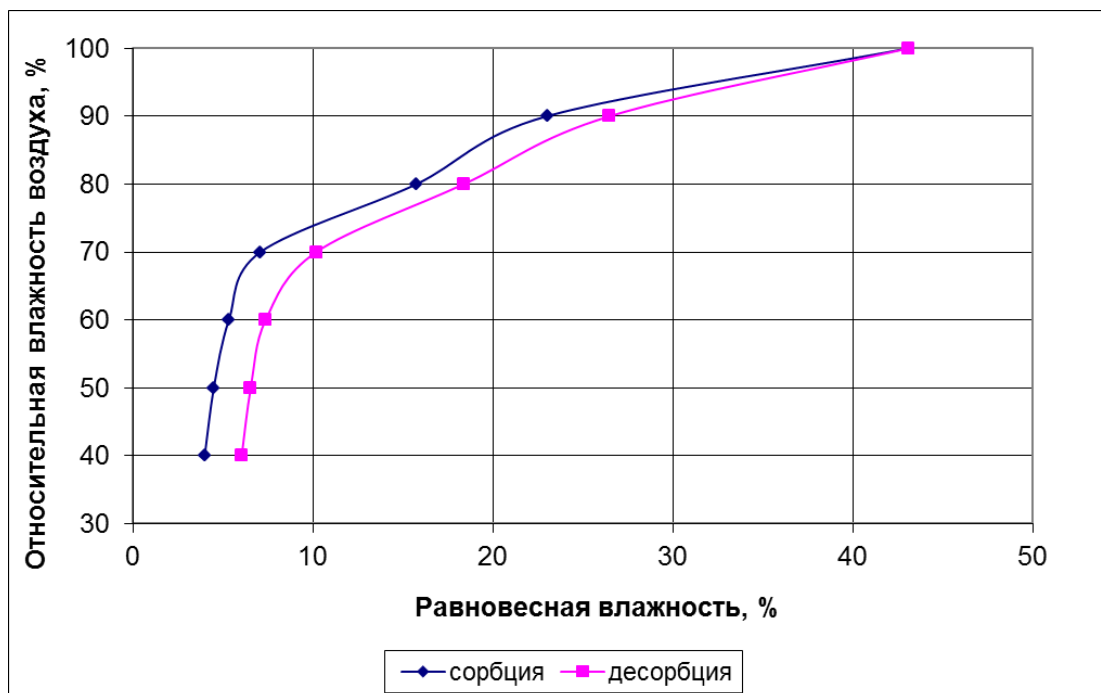


Рисунок 3.37 – Изотермы сорбции и десорбции сыра «Голландский»

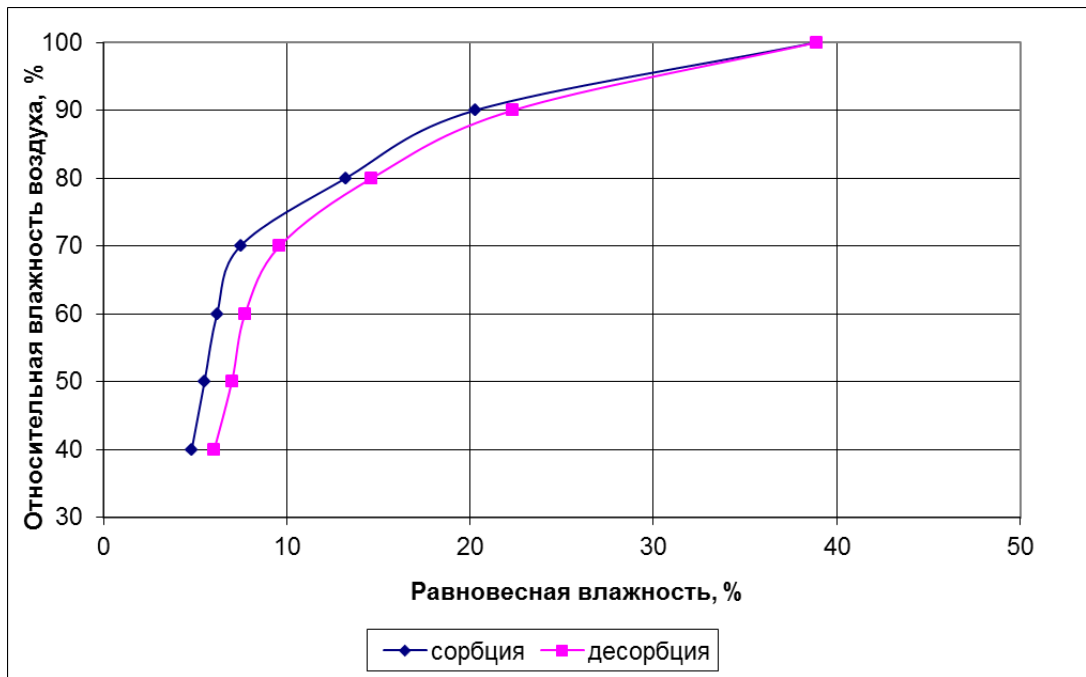


Рисунок 3.38 – Изотермы сорбции и десорбции сыра «Костромской»

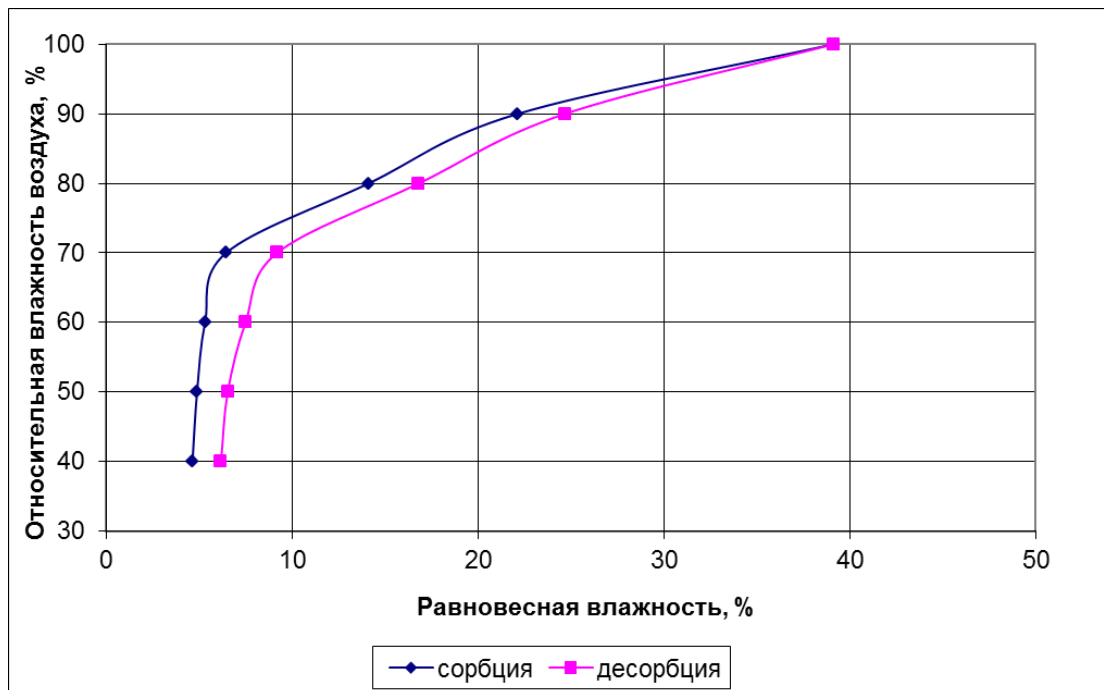


Рисунок 3.39 – Изотермы сорбции и десорбции сыра «Пошехонский»

Были установлены нелинейные зависимости между равновесной влажностью и относительной влажностью воздуха. Это является признаком различных форм связи влаги в сырах. Изотермы сорбции и десорбции имеют точку соприкосновения только при относительной влажности воздуха 100%,

на остальных участках наблюдается расхождение графиков и так называемая площадка гистерезиса.

Наличие площадки гистерезиса обусловлено тем, что в ходе удаления влаги из сыров в микрокапиллярах образуются воздушные пустоты, которые адсорбируются на стенках, что мешает смачиванию. Таким образом, чтобы достичь равновесной влажности в ходе сорбции необходимо повысить относительную влажность воздуха.

Практическая ценность представленных изотерм сорбции и десорбции состоит в том, что сыры рекомендуется сушить до достижения равновесной влажности сорбции которая меньше, чем равновесная влажности десорбции, что устраняет повышение содержания влаги сухих сыров при хранении.

Были выведены уравнения регрессии, которые дают возможность рассчитать равновесную влажность тех или иных сыров в зависимости от относительной влажности воздуха.

- Для сыра «Голландский»:

$$\begin{cases} U_c = 0,017\varphi^2 - 1,81\varphi + 50,55; R^2 = 0,9796 \\ U_d = 0,015\varphi^2 - 1,55\varphi + 44,77; R^2 = 0,9919 \end{cases}$$

- Для сыра «Костромской»:

$$\begin{cases} U_c = 0,0155\varphi^2 - 1,68\varphi + 48,94; R^2 = 0,9687 \\ U_d = 0,014\varphi^2 - 1,5\varphi + 44,98; R^2 = 0,9767 \end{cases}$$

- Для сыра «Пошехонский»:

$$\begin{cases} U_c = 0,016\varphi^2 - 1,72\varphi + 49,28; R^2 = 0,985 \\ U_d = 0,014\varphi^2 - 1,43\varphi + 42,14; R^2 = 0,992 \end{cases}$$

где U_c – равновесная влажность сорбции; U_d – равновесная влажность десорбции; φ – относительная влажность воздуха, %.

Таким образом, в ходе проведенных исследований была установлена высокая степень гигроскопичности сухих полутвердых сыров. Интенсивность

сорбции влаги из окружающей среды уменьшается при хранении продукта. При относительной влажности воздуха 40-70% состояние равновесной влажности наступает через 2÷6 суток хранения. Чем выше относительная влажность воздуха, тем больше времени необходимо для наступления равновесной влажности. Были определены коэффициенты сорбции сухих полутвердых сыров, проведен анализ изотерм сорбции и десорбции. Получены уравнения регрессии для расчета равновесной влажности сыров.

3.7 Разработка технологии вакуумной сушки полутвердых сыров

На основании проведенных исследований была разработана технология вакуумной сушки полутвердых сыров. Технологические режимы вакуумной сушки подбирались исходя из результатов исследований их влияния на качественные показатели сухих сыров, массовую долю влаги, продолжительность сушки и энергозатраты. Технологическая схема производства сухих сыров представлена на рис. 3.40.

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

Перед измельчением сыр освобождают от упаковки, штафа и парафинного 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.

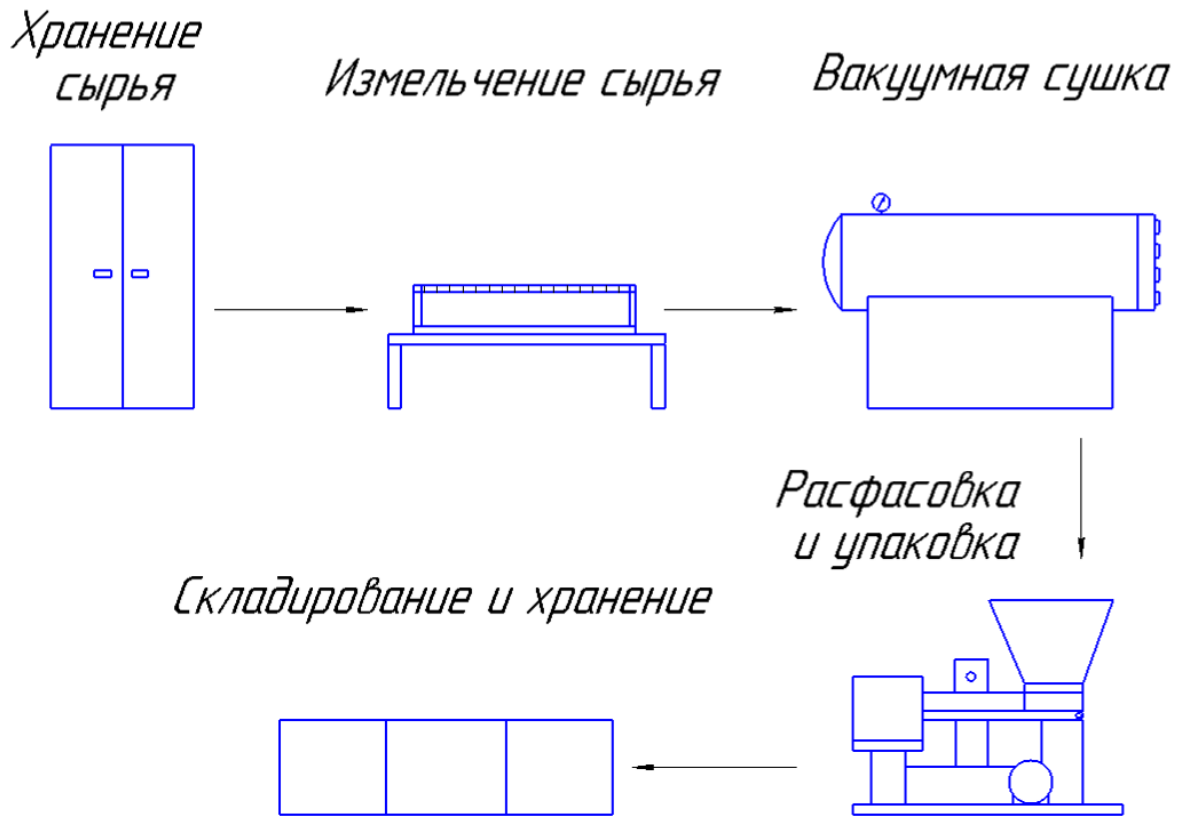


Рисунок 3.40 – Технологическая схема производства сухих полутвердых сыров методом вакуумной сушки

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.

3.8 Экономическая эффективность

В рамках исследований производили также расчет экономических показателей выработки сухих сыров методом вакуумной сушки и расчет экономической эффективности использования разработанной технологии. Известно, что при вакуумной сушке наибольшая доля энергозатрат приходится на сушильные лампы. Подбор способов подвода теплоты, различных конструкций и типов сушильных ламп дает возможность не только менять качество готового продукта, но и его себестоимость. Последний фактор является основным для потребителя наряду с товарными качествами и определяет востребованность продукта на рынке.

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 (режимы были выбраны на основе результатов, изложенных в п. 3.2).

При осуществлении экономических расчетов учитывались затраты на работу сушильных ламп, вакуумного насоса и холодильной машины. Результаты представлены в табл. 3.17.

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.

Таблица 3.17 – 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 |

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 производства 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 рассчитывать 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.

Список литературы

1. Авилова И.А. Возможность использования метода ИК-спектроскопии для определения качества и подтверждения подлинности состава масел растительного происхождения / И.А. Авилова // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. - 2016. - № 4 (12). - С. 71-74.
2. Авроров Г.В. Сокращение энергетических затрат сушки капиллярно-пористых материалов растительного происхождения за счет направленного подвода инфракрасного излучения: дисс. канд. тех. наук: 05.20.01/ Авроров Глеб Валерьевич / Пенза, 2013. – 196 с.
3. Адамов, З.Т. Исследование температурного поля инфракрасных нагревательных систем для сушки пищевых продуктов: дис.... канд. техн. наук: 05.18.12 / Адамов Зайнудин Тажутдинович. – Махачкала, 2005. – 135 с.
4. Акулич, П.В. Неизотермический влагоперенос в пористых телах при импульсных тепловых и вакуумных воздействиях / П.В. Акулич, Н.Н. Гринчик, А.В. Акулич // Труды международного научно-технического семинара «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов». – Воронеж, 2010. – С. 30-38.
5. Акулич, П.В. Термогидродинамические процессы в технике сушки. – Минск, ИМТО НАНБ, 2002. – 268 с.
6. Алексанян И.Ю. Изучение кинетических закономерностей и моделирование тепло- и массопереноса в процессе сушки джекфрута / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, А.Х.Х. Нугманов, Т.С. Нгуен // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2020. - № 1. - С. 8-22.
7. Алексанян, И.Ю. Математическое моделирование процессов высокоинтенсивной вакуумной сушки пищевых биополимерных систем при ИК-энергоподводе./ Материалы Международной п. техн. конференции, посвященной 70-летию КГТУ. ч 4. - 2000. - С.46-47.

8. Алтухов, И.В. Анализ способов сушки пищевых продуктов / И.В. Алтухов, В.Д. Очиров // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. – 2009. – №36. С. 16-21.
9. Алтухов И.В. Импульсные инфракрасные излучатели для сушки растительного сырья / И.В. Алтухов, Н.В. Цугленок // Актуальные вопросы аграрной науки. - Красноярск, 2018 - №27 - С. 5-12.
10. Алтухов И.В. Классификация методов и способов сушки плодово-овощной продукции / И.В. Алтухов, С.М. Быкова, А.М. Свиная // Baikal letter daad. - Иркутск, 2020. - №1 - С. 42-47.
11. Андрианов, В.П. Тепломассоперенос при сушке понижением давления / В.П. Андрианов, Р.Г. Сафин, В.А. Лабутин, Л.Г. Голубев // Современные аппараты для обработки гетерогенных сред / ЛТИ им. Ленсовета. Л., 1984. - С. 8-13.
12. Афонькина В.А. Инфракрасная сушка термолабильного сырья на примере зеленых культур : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Афонькина Валентина Александровна. - Челябинск, 2015 - 24 с.
13. Багаев И.А. Системный подход к исследованию процесса сублимационной сушки / И.А. Багаев, А.В. Маркова // Инновации в здоровье нации. Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. - 2017. - С. 94-99.
14. Бартенева О. "Обзор рынка сыров - 2016": анализ производства сыров / О. Бартенева // Переработка молока. - 2016. - № 7 (201). - С. 26-29.
15. Бахтияров Л.И. Закономерности термовакуум-импульсной сушки капиллярно-пористых материалов / Л.И. Бахтияров, В.А. Петров, В.Ф. Мадьякин, А.Б. Лившиц // Бутлеровские сообщения. - 2021. - Т. 67. - № 9. - С. 93-97.
16. 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.

17. Бессарабов А.М. Моделирование высокоинтенсивных процессов сушки в технологии особо чистых веществ / А.М. Бессарабов, Т.А. Николенко, Д.А. Баранов, А.Г. Вендило // V Международный научно-технический симпозиум «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов (СЭТТ - 2014)). - Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - Иваново, 2014. - С.29-33.

18. Блынская Е.В. Математические модели процесса сублимации и оптимизация режимов лиофилизации / Е.В. Блынская, С.В. Тишков, К.В. Алексеев, С.В. Минаев // Российский биотерапевтический журнал. - 2018. - Т. 17. - № 3. С. 20-28.

19. 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.

20. 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.

21. 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)

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.
26. Бурова Н.О. Обзор применения вакуумных сушильных установок в зарубежной литературе / Н.О. Бурова // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. - 2019. - № 21. - С. 188-191.
27. Буянов, О.Н. Влияние гранулометрического состава и толщины слоя обезжиренного творога на процесс его вакуумной сушки / О.Н. Буянов, Л.М. Захарова, А.Н. Расщепкин, В.А. Ермолаев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – №10. – С. 32-33.
28. Бышов Д.Н. Математическое моделирование процесса вакуумной инфракрасной сушки перговых сотов / Д.Н. Бышов, Д.Е. Каширин, И.А. Успенский, И.А. Юхин, С.С. Морозов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. - 2019. - № 4 (44). - С. 82-87.
29. Василенко В.Н. Эксергетический анализ технологии осциллирующей сушки семян масличных культур / В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова, И.В. Драган, Н.А. Михайлова, А.А. Щепкина, Д.В. Воропаева // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2018. - Т. 80. - № 1 (75). - С. 81-89.
30. Васильев А.Н. Математическая модель сушки зерна электроактивированным воздухом / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Н.Н. Грачева // Вестник ВИЭСХ. - 2014. - № 1 (14). - С. 61-67.
31. Волончук, С.К. Теоретическое обоснование и практическое применение инфракрасного излучения в технологии сушки растительного сырья / С.К. Волончук // Переработка сельскохозяйственной продукции. – 2011. - № 9-10. – С. 116-123.
32. Волончук, С.К. Техника и технологии сушки растительного сырья с использованием инфракрасного излучения / С.К. Волончук, Л.П. Шорь

никова, Г.П. Филлиманчук // РАСХН Сиб. Отделение. ГНУ СибНИТППТИП. Новосибирск: 2006. – 36 с.

33. Гавриленков А.М. Методика обоснования выбора способа сушки и типа сушильных установок для АПК / А.М. Гавриленков, Е.В. Батурина, А.Б. Емельянов, С.А. Пенкин // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. - 2014. - № 2 (2). - С. 60-64.

34. Горяев А. Применение утилизаторов теплоты и тепловых насосов для экономии энергии при сушке материалов / А. Горяев // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе. сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова. - 2015. - С. 343-346.

35. Гинзбург, А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности / А.С. Гинзбург - М.: Пищевая промышленность, 1966. – 407 с.

36. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973.

37. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов. М.: Пищепромиздат, 1960.

38. Гинзбург, А.С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое / А.С. Гинзбург, В.А. Резчиков. - М.: Пищепромиздат, 1966.

39. Горелик О.В. Технология производства и качество сычужных сыров из молока коров разных пород / О.В. Горелик, Н.А. Федосеева, И.В. Кныш // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. - 2019. - № 57. - С. 86-92.

40. Гудков, А.В. Сыроделие: технологические, биологические и физико-химические аспекты / А.В. Гудков; под ред. С.А. Гудкова. – М.: ДеЛи принт, 2003. – 800 с.

41. Демидов С.Ф. Источники инфракрасного излучения с энергоподводом для термообработки пищевых продуктов / С.Ф. Демидов, А.С. Деми-

дов, С.С. Беляева, Д.А. Ободов, Е.А. Соколова, А.А. Акжигитова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия "Процессы и аппараты пищевых производств". – 2014. - № 4 (22).

42. Дикий, Н.П. Некоторые особенности термовакуумной сушки / Н.П. Дикий, А.М. Егоров, В.А. Кутовой, Е.П. Медведева, А.А. Николаенко, Н.П. Тишкевич // Вопросы атомной науки и техники. - 2007. - № 4.- Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (16). - С. 53-57.

43. Добровольский В.Ф. Научное обеспечение развития пищекоцентрализованной отрасли на период до 2020 года / В.Ф. Добровольский, С.В. Зиновьева, Н.А. Кожин // Индустрия питания. - 2017. - № 3 (4). - С. 13-17.

44. Дранников А.В. Использование теории подобия при описании процесса сушки свекловичного жома перегретым паром/ А.В. Дранников, С.В. Куцов, Е.В. Костина, В.П. Ясиневская // Вестник ВГТА. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». - 2010. - №1. - С.25-28.

45. Дубкова, Н.З. Кинетика вакуумной сушки при получении порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакбеков, Н.А. Николаев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. –№10. – С. 23-25.

46. Дяченко, Э.П. Моделирование теплообмена при инфракрасной сушке сульфанола во вспененном состоянии / Э.П. Дяченко, В.В. Ермолаев, Т.Г. Васильева, Н.П. Васина // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. - 2010. - № 2. - С. 95-99.

47. 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.

48. Ермолаев, В.А. Вакуумные технологии молочно-белковых концентратов: монография / В.А. Ермолаев, А.Ю. Просеков. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2010. – 212 с.

49. Ермолаев, В.А. Способы уменьшения удельных затрат теплоты при вакуумной сушке молочных продуктов / В.А. Ермолаев, В.С. Сметанин // Вестник КрасГАУ. – 2010. - №1. – С. 160-164.

50. Ермолаев, В.В. Зависимость скорости сушки препарата «Бифидумбактерин» в обобщенных координатах от влияющих факторов при инфракрасном энергоподводе / В.В. Ермолаев, А.Х. Нугманов, Ю.А. Максименко // Известия вузов. Пищевая технология. – 2009. - № 1. – С. 122-123.

51. Завалий А.А. Инфракрасная сушка плодов и овощей / А.А. Завалий, И.В. Янович // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Кримський агротехнологічний університет». Серія «Сільськогосподарські науки». – 2011. – Вип. 137. – С. 189-195.

52. Завалий, А. А. Оценка адекватности описания конечно-элементными моделями лучистого теплообмена в устройствах инфракрасной сушки продуктов питания / А. А. Завалий // Наукові пр. Півден. філ. нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України «Крим. агротехнол. ун-т». – 2012.– Вип 146. – С. 61–68.

53. Захарова, Л.М. Кинетика и массообмен при вакуумной сушке обезжиренного творога / Л.М. Захарова, В.А. Ермолаев, Л.М. Архипова // Молочная промышленность. – 2008. – № 10. – С. 86–87.

54. Захарова, Л.М. Математическая модель вакуумной сушки обезжиренного творога / Л.М. Захарова, О.Н. Буянов, А.Н. Расщепкин, В.А. Ермолаев // Сыроделие и маслоделие. – 2008. – № 2. – С. 54–55.

55. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл // Пер с англ. М.: Мир, 1975. – 934 с.

56. Зимин Л.С. Проблема энергосбережения в АПК / Л.С. Зимин, А.С. Егизарян, А.Ю. Леснов // Актуальные проблемы энергетики АПК. - 2017. - С. 82.

57. Иванов И.В. Исследование вакуум-инфракрасной сушки чипсов из мяса птицы / И.В. Иванов, Г.В. Гуринович // Техника и технология пищевых производств. - 2013. - № 3 (30). - С. 22-26.
58. Иванова И.В. Условия комбинированной конвективной вакуум-импульсной сушки растительных продуктов / И.В. Иванова, А.А. Горелова, Е.С. Соколова, Н.А. Кондаков, К.И. Черемисина // Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства. - 2016. - Т. 1. - № 9. - С. 57-60.
59. Изотова, Л.А. Термовлагоусадочные явления в процессе сушки ягод / Л.А. Изотова, В.А. Шуляк // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – №2. – С. 31-35.
60. Кадиров У. Влияние импульсно-прерывного режима на качество продукта при ИК-вакуумной сушки овощей / У. Кадиров, М. Арипов, Ш. Маматов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. - 2018. - № 10. - С. 18-21.
61. Калякин С.Н. От молока до сыра. Биохимические процессы производства / С.Н. Калякин // Молодой ученый. - 2021. - № 13 (355). - С. 16-21.
62. Каримов Х.Т. Сушка зерна инфракрасными лучами / Х.Т. Каримов, И.Х. Масалимов // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Лапшинские чтения: Материалы IX Международной научно-практической конференции. - 2013. - С. 280-282.
63. Карягин Д.А. Использование процесса инфракрасной сушки мясных изделий на предприятиях общественного питания / Д.А. Карягин, С.В. Шихалев // Проблемы идентификации, качества и конкурентоспособности потребительских товаров. Сборник статей V Международной конференции в области товароведения и экспертизы товаров. - 2017. - С. 150-153.
64. Касаткина, В.В. Расчет плотности потока ИК-излучения при испарительном самозамораживании кисломолочных заквасок // Аграрная

наука: состояние и проблемы: Труды региональной научно-практической конференции -Ижевск, Изд-во ИжГСХА, 2002.

65. Киселева Т.Ф. Технология сушки: Учебно-методический комплекс /Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. - Кемерово, 2007. - 117 с.

66. Колтовская С.Г. Оборудование для производства сыра / С.Г. Колтовская, Л.П. Ладария, Н.Д. Морозова // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам X Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И. С. Косенко. 2017. - С. 544-545.

67. Кондрашева С.Г. Практическая реализация процесса удаления влаги из дисперсных материалов в режиме вакуумного осциллирования / С.Г. Кондрашева, Д.А. Хамидуллина, В.А. Лашков // Наука сегодня: вызовы и решения. материалы международной научно-практической конференции: в 2 частях. - 2018. - С. 34-36.

68. Константинов, В.Н. Исследование влияния понижения давления в сушильной камере при конвективной сушке ряда лесных ягод и плодов на скорость и время сушки при 40°C / В.Н. Константинов // Инженерно-техническое обеспечение АПК. – 2002. – №4. – С. 1015.

69. Лабутин, В.А. Нестационарный тепломассоперенос при сушке понижением давления / В.А. Лабутин, Л.Г. Голубев, Р.Г. Сафин и др. // ИФЖ. 1983. -Т.45. - №2. -С. 272-275.

70. Лабутин, В.А. Тепломассоперенос при сушке материалов понижением давления / В.А. Лабутин, Р.Г. Сафин, Л.Г. Голубев // Тепломассообмен в процессах химической технологии. КХТИ им. С.М.Кирова. Казань. - 1980. - Вып.8. - С. 25-27.

71. Лапшин С.М. Сравнительный анализ различных технологий производства сыра "Крестьянский" / С.М. Лапшин, А.В. Степанов // Молодежь и наука. - 2021. - № 4.

72. Линкевич, Е.Т. Исследование процесса копчения, качества и безопасности полутвердого сыра / Е.Т. Линкевич, Н.Б. Гаврилова, И.Р. Зарипов // Аграрный вестник Урала. – 2013. - № 6 (112). – С. 47-51.
73. Лыков А. В. Теория сушки. М., 1968. 472 с.
74. Лыков, А.В. Теория сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов пищевой промышленности / А.В. Лыков, Л.Я. Ауэрман // М.: Пищепромиздат, 1946 - 287 с.
75. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессе сушки. М.: Госэнергоиздат, 1956.
76. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954. - 250 с.
77. Медведев А.В. К вопросу комбинированной инфракрасной сушки пищевых продуктов / А.В. Медведев, В.М. Попов, В.Н. Левинский, В.А. Афонькина // Актуальные проблемы энергетики АПК. Материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием. Под общ. ред. Трушкина В.А. - 2019. - С. 156-158.
78. Надыкта В.Д. Технология порошкообразных пищевых добавок / В.Д. Надыкта, Е.В. Щербакова, Е.А. Ольховатов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2017. - № 131. - С. 659-671.
79. Никифорова Т.А. Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодовоовощной продукции и виноградарства / Т.А. Никифорова, Е.В. Волошин // Оренбург, 2017. - Том Часть 1. – 148 с.
80. Нурмашева А.А. Совершенствование технологии мягких сыров с использованием растительного сырья / А.А. Нурмашева, С.Б. Байтуkenова // Студенческий вестник. - 2020. - № 12-5 (110). - С. 15-19.
81. Ольшанский А.И. Исследование теплообмена в процессе сушки методом регулярного режима / А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. - 2012. - Т. 85. - № 2. - С. 385-391.

82. Остроумов, Л.А. Микроструктура зрелого сыра «Покровский» до сушки и после сублимационной и вакуумной сушки / Л.А. Остроумов, В.А. Ермолаев // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. - 2011. - № 4. - С. 145-149.

83. Павлова Ю.И. Разработка конструкции лабораторной установки для сушки пищевых продуктов в псевдоожиженном слое / Ю.И. Павлова, А.А. Юрьев // Морские технологии: проблемы и решения - 2020. Сборник трудов по материалам II Национальной научно-практической конференции преподавателей и аспирантов «Морские технологии: проблемы и решения - 2020». под общ.ред. Масюткина Е. П., Керчь, 2020. - С. 138-140.

84. Падохин В.А. Комплексное математическое описание тепло- и массопереноса в процессе сушки неограниченного тела цилиндрической формы аналитическими методами теории теплопроводности / В.А. Падохин, Г.А. Зуева, Г.Н. Кокурина, Н.Е. Кочкина, С.В. Федосов // Теоретические основы химической технологии. - 2015. - Т. 49. - № 1. - С. 54.

85. Патент № 2004133432 Российская Федерация, МПК F26B 5/04. Способ вакуумной сушки пищевых продуктов/ Попов А.М., Белокуров А.Г., Попов А.А. № 2004133432/13. Заявлено 16.11.2004; Оpubл. 27.04.2006.

86. Патент № 2293265 Российская Федерация, МПК F26B 11/02, F26B 5/04. Установка для вакуумной сушки/ Матюхин Б.П., Сидоров Д.В., Трегубов А.А., Шебалин А.И. № 2005119680/06. Заявлено 24.06.2005; Оpubл. 10.02.2007.

87. Патент № 2299385 Российская Федерация, МПК F26B 9/06, F26B 5/04. Устройство вакуумной сушки и способ вакуумной сушки/ Ермаков С.А. № 2005137901/06. Заявлено 05.12.2005; Оpubл. 20.05.2007.

88. Патент № 2357421 Российская Федерация, МПК A23C 1/00, A23C 19/076. Способ вакуумной сушки творога/ Буянов О.Н., Расщепкин А.Н., Ермолаев В.А., Захаров С.А., Архипова Л.М. № 2007142048/13. Заявлено 13.11.2007; Оpubл. 10.06.2009.

89. Патент № 2405352 Российская Федерация, МПК А23С 19/086, А23В 5/04. Способ вакуумной сушки сыра/ Остроумов Л.А., Просеков А.Ю., Ермолаев В.А. № 2009121003/13. Заявлено 02.06.2009; Оpubл. 10.12.2010.

90. Патент № 2426462 Российская Федерация, МПК А23L3/44. Способ вакуумной сушки/ Просеков А.Ю., Ермолаев В.А., Иванова С.А. № 2010107834/13. Заявлено 03.03.2010; Оpubл. 20.08.2011.

91. Патент № 2462867 Российская Федерация, МПК А23В7/02. Способ вакуумной сушки ягод/ Ермолаев В.А., Федоров Д.Е., Масленникова Г.А. № 2011122882/13. Заявлено 06.06.2011; Оpubл. 10.10.2012.

92. Патент № 2591731 Российская Федерация, МПК F26В 7/00, F26В 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.

93. Патент № 2608645 Российская Федерация, МПК А23С 1/00, А23С 3/02, А23С 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.

94. Писарева Е.В. Влияние вакуумно-импульсной сушки на качество плодоовощных порошков и мясных паштетов с их использованием: дисс. ... канд. тех. наук: 05.18.15 / Писарева Елена Витальевна. Кемерово, 2012. – 196 с.

95. Подгорный С.А. Постановка задачи описания переноса тепла, массы и давления при сушке / С.А. Подгорный, Е.П. Кошевой, В.С. Косачев, А.А. Схаляхов // Новые технологии. - 2014. - № 3. - С. 20-27.

96. «Полезные» традиции // Газета «Все о молоке, сыре, мороженом». – 2005. – № 8. – С. 3.

97. Полякова А.А. Традиционные и оригинальные способы производства сыров / А.А. Полякова // Инновационные подходы в отраслях и сферах. - 2019. - Т. 4. - № 6. - С. 39.

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

99. Расщепкин А.Н. Влияние температуры сублимационной сушки на качество дикорастущих ягод / А.Н. Расщепкин, Д.Е. Федоров, И.А. Короткий // Современные технологии продуктов питания. - 2015. - С. 125-128.

100. Расщепкина, Е.А. Результаты экспериментальных исследований вакуумной сушки брусники / Е.А. Расщепкина, А.М. Попов, В.В. Турин, А.Н. Расщепкин // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2007. – №9. – С. 67-70.

101. Ратникова, Л.Б. Вакуумная инфракрасная сушка – технология щадящей переработки растительного и животного сырья / Ратникова Л. Б., П.Е. Влощинский, Г.И. Широченко, В.П. Романов // Вестник Сибирского университета потребительской кооперации. – 2012. - № 1(2). – С. 96-101.

102. Рогачев А.Ф. Оптимизация инновационных проектных решений в продовольственной сфере / А.Ф. Рогачев, Д.В. Шатырко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. - 2015. - № 1 (37). - С. 223-228.

103. Родионов Ю.В. Проблемы и перспективы производства растительных порошков / Ю.В. Родионов, О.В. Ломакина, Д.В. Никитин, Ю.А. Чумиков, А.С. Ратушный, С.И. Данилин, Ю.Ю. Родионов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. -2019. - № 1 (27). - С. 69-77.

104. Родионов, Ю.В. Сравнительный анализ эффективности сублимационной и двуступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки / Ю.В. Родионов, И.В. Попова, Д.А. Шацкий // Труды международного научно-технического семинара «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов». – Воронеж, 2010. – С. 160-166.

105. Рудобашта С.П. Использование теоретических положений академика А.В. Лыкова в современных моделях теплообмена при сушке / С.П. Рудобашта // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обра-

ботки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе. сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова. - 2015. - С. 21-28.

106. Салмонов С.Р. Технические сушильные установки нового поколения, применяемые для многофункциональной сушки сельскохозяйственной продукции / С.Р. Салмонов, И.В. Алтухов // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК. - 2019. - С. 117-123.

107. Семенищева А. Инновационные решения для производства сыров и сырных продуктов / А. Семенищева // Молочная река. - 2018. - № 1 (69). - С. 30-31.

108. Семенов, Г.В. Качество и энергозатраты в процессах вакуумного обезвоживания термолабильных материалов / Г.В. Семенов, Е.В. Буданцев, М.С. Булкин // Известия вузов. Пищевая технология. – 2011. - № 1. – С. 65-68.

109. Семенов Г.В. Сушка термолабильных продуктов в вакууме - инновационная технология XXI века / Г.В. Семенов, И.С. Краснова, А.В. Лаврова // Пищевая индустрия. - 2014. - № 2. - С. 56-61.

110. Семенов, Г.В. Тепломассообмен в процессах низкотемпературного вакуумного обезвоживания термолабильных материалов и его аппаратурное оформление: дис. ... докт. наук: 05.18.12 / Семенов Геннадий Вячеславович. – М., 2003. – 479 с.

111. Семенова А.А. Использование вакуумной сушки, как альтернативы конвекционной при производстве сырокопченых и сыровяленых мясных продуктов / А.А. Семенова, В.В. Насонова, М.И. Гундырева // Научно-практическое обеспечение холодильной промышленности. Сборник научных трудов к 85-летию ВНИХИ, Москва, 2015. - С. 207-216.

112. Скурихин, И.М. и др. Химический состав российских пищевых продуктов: Справочник / Под ред. член-корр. МАИ, проф. И. М. Скурихина и академика РАМН, проф. В. А. Тутельяна. –М.: ДеЛи принт, 2002. –236 с.

113. Слижук Д.С. Кинетика сушки дисперсных материалов комбинированным способом с использованием СВЧ-нагрева / Д.С. Слижук, П.В. Акулич // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе. сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова. - 2015. - С. 58-62.

114. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. — М.: Наука, 1981. 260 с.

115 Сороко, О.Л. Перспективы сушки пищевых продуктов / О.Л. Сороко, Т.П. Троицкая, А.А. Литвинчук и др. // Продукты длительного хранения. – 2008. – №1. – С. 6-7.

116. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса/ А. Д. Полянин, А. В. Вязьмин, А. И. Журов, Д. А. Казенин. М. : Факториал, 1998.-368 с.

117. Счисленко Д.М. Повышение эффективности ИК-сушки плодов рябины черноплодной путем исследования их спектральных характеристик / Д.М. Счисленко, А.В. Бастрон // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2020. - № 5 (187). - С. 159-165.

118. Тарасов А.В. Современные методы сушки плодоовощной продукции / А.В. Тарасов // В мире научных открытий. Материалы V Всероссийской студенческой научной конференции (с международным участием). - 2016. - С. 219-221.

119. Федоров Д.Е. Математическое моделирование внутреннего теплообмена в процессе вакуумной сушки ягод / Д.Е. Федоров, В.А. Ермолаев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2014. - № 2. - С.11-13.

120. Хасаншина Р.Т. Разработка энергосберегающих технологий в области вакуумной сушки материалов / Р.Т. Хасаншина, А.И. Ахметов // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых - 2015. сборник научных статей 4-й Международной молодежной научной конференции: в 4-х томах. - 2015. - С. 233-236.

121. Хмелев В.Н. Интенсификация процесса сушки пищевых продуктов / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.А. Терентьев, А.С. Боченков, В.А. Нестеров, Р.В. Барсуков // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2019). Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. - 2019. - С. 276-280.

122. Чесноков Н.С. Исследование и разработка технологии сублимационной сушки сыров: дисс. канд. техн. наук. 05.18.04/ Чесноков Никита Сергеевич. Кемерово, 2012. – 140 с.

123. Шевцов А.А. Резервы энергоэффективности конвективной сушки дисперсных материалов при переменных режимах / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2017. - Т. 79. - № 2 (72). - С. 17-23.

124. Шеметова Е.Г. Процессы и аппараты пищевой технологии по переработке растительного сырья / Е.Г. Шеметова // Перспективное развитие науки, техники и технологий. материалы 3-й Международной научно-практической конференции: в 3-х томах. - 2013. - С. 426-433.

125. Шерстнева В.С. Технологии производства сыра / В.С. Шерстнева // Молодежь и наука. - 2021. - № 2.

126. Щеткин Б.Н. Математическая модель процесса сушки дисперсных материалов во взвешенном состоянии / Б.Н. Щеткин // Sciences of Europe. - 2021. - № 85-1 (85). - С. 45-50.

127 Angélique, Léonard Effect of far-infrared radiation assisted drying on microstructure 1 of banana slices: An illustrative use of X-ray microtomography in microstructural evaluation of a food product / Angélique, Léonard, Silvia Blacher, Chatchai Nimmol, Sakamon Devahastin // Journal of Food Engineering - J FOOD ENG, 2008. - vol. 85. - №. 1, p. 154-162.

128. Byrnes James Unexploded Ordnance Detection and Mitigation. — Springer, 2009. — P. 21–22.

129. Caparino, OA Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder / Caparino, OA, Tang J, Nindo CI, Sablani SS, Powers JR, Fellman JK // Food Engineering. – 2012. - № 111. – p. 135–148
130. Chen, X.D. Moisture diffusivity in food and biological materials. *Drying Technology* 25. – 2007. – P. 1203–1213.
131. Chin, S. K. Drying characteristics and quality evaluation of kiwi slices under hot air natural convective drying method [Text] / S. K. Chin, E. S. Siew // *International Food Research Journal*. - 2015. - N 22 (6). - P. 48-57.
132. *Drying Technologies in Food Processing* / Edited by Chen X.D., Mujumdar A.S. United Kingdom: Blackwell Publishing, 2008. – 322 p.
133. Gupta K. Mass and color of foamed and non foamed grape concentrate during convective drying process: A comparative study [Text] / K. Gupta, M.S. Alam // *J.Eng.Technol.Res.* - 2014. - Vol 6(4). - Pp. 48-67.
134. Joao B. Laurindo Creating microstructure of dehydrated fruits and vegetables with a multi-flash drying process / Joao B. Laurindo, Barbara Porciuncula, Marta F. Zotarelli, Ricardo Monteiro // *ESPCA. Sao Paulo School of Advanced Science Advances in Molecular Structuring of Food Materials*. – 2013. – 35 pp.
135. Kant K. Thermal Energy storage based infrared drying systems / K. Kant, A. Shukla, A. Sharma, A. Kumar, A. Jain // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. - 2016. - N 34. -P. 86-99.
136. Khozyaev I. Vacuum infrared dryer for drying fruit / I. Khozyaev, D. Savenkov, A. Shcherbakov, R. Mekhraliev, V. Serdyuk // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE 2021)*. - 2021. - pp. 022092.
137. Kumar, Y Multiphysics modelling of convective drying of food materials [Text] / Y. Kumar, C. Karim, Suvash C., Joardder ets. // *Proceedings of the Global Engineering, Science and Technology Conference*. - Global Institute of

Science and Technology. -2012. - Dhaka, Bangladesh.

<http://eprints.qut.edu.au/56082/>

138. Malgorzata, Nowacka Microstructure changes of osmodehydrated kiwifruit sliced pretreated with ultrasound / Malgorzata Nowackaa, Urszula Tylewiczb, Federica Balestrab, Marco Dalla Rosab and Dorota Witrowa- Rajcherta // InsideFood Symposium. - 2013, Leuven, Belgium. – 5 pp.

139. Mirzaee, E. Determining of moisture diffusivity and activation energy drying of apricots [Text] / E. Mirzaee, S. Rafiee // Res. Agr. Eng. - 2015. - N 55 (3). -P. 114-120.

140. Mongpraneet, S. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions / S. Mongpraneet, T. Abe, T. Tsurusaki // J. Food Eng. V. 55. – 2002. – P. 147–156.

141. Mongpraneet, S. Kinematic Model for a far infrared vacuum dryer / S. Mongpraneet, T. Abe, T. Tsurusaki // Drying Tech. V. 22. – 2004. – № 7. – P. 1675–1693.

142. Omolola, A. O. Modeling of thin layer drying characteristics of banana cv. Luvhele [Text] / A. O. Omolola, A. I. O. Jideani // Bulgarian Journal of Agricultural Science. - 2015. - N 21 (2). - P. 342-348.

143. Peamsuk Suvarnakuta A mathematical model for low-pressure superheated steam drying of a biomaterial / Peamsuk Suvarnakuta, Sakamon Devahastin, Arun S. Mujumdar // Thammasat University. – 2006, P. 675-683.

144. Ramos, I.N. Quantification of microstructural changes during first stage air drying of grape tissue / Ramos, I.N., Silva C.L.M., Sereno A.M., Aguilera J.M. // Journal of Food Engineering. – 2004. - v.62, p.159-164.

145. Rudobashta S. Mathematical modeling and numerical simulation of seeds drying under oscillating infrared irradiation / S. Rudobashta, N. Zuev, G. Zueva // Drying Technology. - 2014. - vol. 32. - No 11. - pp. 1352-1359.

146. Sabine E. Kulling, Harshadai M. Rawel. Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) A Review on the Characteristic Components and Potential Health Effects. // Planta Med 2008, - N 74. - p. 1625-1634.

147. Shaimardanov B.P. Development and calculation of technological schemes of vacuum-solar dryers / B.P. Shaimardanov, A.P. Tajimuratova, P. Berdimurodov, J.B. Khujamkulov, M.Q. Asrorova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure Solutions, AEGIS 2021". - 2021. - pp. 012056.

148. Su Y. Low oil content potato chips produced by infrared vacuum pre-drying and microwave-assisted vacuum frying / Y. Su, M. Zhang, W. Zhang, C. Liu, B. Bhandari // Drying Technology. - 2018. – vol. 36. - No 3. - pp. 294-306.

149. Swasdisevi, T. Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices / T. Swasdisevi, S. Devahastin, R. Ngamchum, S. Soponronnarit, J. Songklanakarin // Sci. Technol. V. 29. – 2007. – № 3. – P. 809–816.

150. Xu Si Qinqin Chen. Infrared radiation and microwave vacuum combined drying kinetics and quality of raspberry [Text]/ Xu Si Qinqin Chen, Jinfeng Bi., Jianyong Yi // Journal of Food Process Engineering. - 2015. - Pp. 1-14.

151. Zlatanovic, I. Low-temperature convective drying of apple cubes [Text] / I. Zlatanovic, M. Komatina, D. Antonijevi // Applied Thermal Engineering. -2013. - Vol. 53. - P. 114-123.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия»
Научно-исследовательская лаборатория «Агроэкология»
650056, г. Кемерово, ул. Марковцева, 5

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО Кузбасская ГСХА


Ижмулкина Е.А.

ПРОТОКОЛ № 1 от 25.01.2021 г.

Наименование заказчика: Брюханов М.А.

Объект испытаний: сыры

Изготовитель: не указан

Дата изготовления: не указана

Сведения об отборе образцов: образцы отобраны и предоставлены заказчиком

Дата поступления пробы: 19.01.2021

Количество пробы: 6 образцов по 0,2 кг

Дата испытаний: 20.01.2021 – 25.01.2021

Используемая НД МВИ

ГОСТ Р 51486-99 «Масла растительные и жира животные. Получение метиловых эфиров жирных кислот»

Результаты испытаний

| Состав жирных кислот, % | Номер образца | | | | | |
|------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Деценовая C _{10:1} | 0,24 | 0,22 | 0,21 | 0,24 | 0,24 | 0,21 |
| Каприловая C _{8:0} | 0,97 | 0,92 | 0,85 | 0,94 | 0,88 | 0,93 |
| Каприновая C _{10:0} | 2,39 | 2,26 | 2,4 | 2,64 | 2,21 | 2,31 |
| Капроновая C _{6:0} | 1,19 | 1,17 | 1,29 | 1,44 | 1,12 | 1,29 |
| Лауриновая C _{12:0} | 3,06 | 2,92 | 3,05 | 3,36 | 3,05 | 3,15 |
| Линолевая C _{18:2} | 1,86 | 1,87 | 1,73 | 1,82 | 1,89 | 1,92 |
| Линоленовая C _{18:3} | 0,79 | 0,8 | 0,89 | 0,93 | 0,78 | 0,79 |
| Масляная C _{4:0} | 0,91 | 1,14 | 0,91 | 1,16 | 0,89 | 1,08 |
| Миристиновая C _{14:0} | 10,68 | 10,34 | 11,7 | 10,03 | 11,44 | 10,87 |
| Миристолеиновая C _{14:1} | 1,39 | 1,3 | 1,44 | 1,16 | 1,36 | 1,25 |
| Олеиновая C _{18:1} | 30,64 | 30,79 | 32,46 | 31,71 | 31,25 | 31,55 |
| Пальмитиновая C _{16:0} | 29,12 | 28,54 | 25,34 | 28,28 | 28,33 | 26,45 |
| Пальмитолеиновая C _{16:1} | 2,12 | 2,62 | 1,95 | 2,53 | 2,19 | 2,69 |
| Стеариновая C _{18:0} | 14,67 | 15,11 | 15,81 | 13,77 | 14,41 | 15,51 |

Образец № 1 – Сыр «Голландский» до сушки

Образец № 2 – Сыр «Голландский» после сушки

Образец № 3 – Сыр «Костромской» до сушки

Образец № 4 – Сыр «Костромской» после сушки

Образец № 5 – Сыр «Пошехонский» до сушки

Образец № 6 – Сыр «Пошехонский» после сушки

Протокол оформил: с.н.с. НИЛ «Агроэкология»



Белова Д.Д.

Зав. НИЛ «Агроэкология»



Харченко Е.Н.

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
 «Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия»
 Научно-исследовательская лаборатория «Агрэкология»
 650056, г. Кемерово, ул. Марковцева, 5

УТВЕРЖДАЮ
 Ректор ФГБОУ ВО Кузбасская ГСХА

 Ижмулкина Е.А.

ПРОТОКОЛ № 23 от 22.02.2021 г.

Наименование заказчика: Брюханов М.А.

Объект испытаний: сыры

Изготовитель: не указан

Дата изготовления: не указана

Сведения об отборе образцов: образцы отобраны и предоставлены заказчиком

Дата поступления пробы: 15.02.2021

Количество пробы: 6 образцов по 0,3 кг

Дата испытаний: 15.02.2021 – 22.02.2021

Используемая НД МВИ

ГОСТ Р 51471-99 «Жир молочный. Метод обнаружения растительных жиров газожидкостной хроматографией»

Результаты испытаний

| Массовая доля органических кислот, мг/кг | Номер образца | | | | | |
|--|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Молочная | 19045,24 | 19736,01 | 23702,41 | 26830,20 | 18905,59 | 23005,08 |
| Уксусная | 670,41 | 512,84 | 554,18 | 325,65 | 755,92 | 527,39 |
| Муравьиная | 99,12 | - | 112,42 | - | 65,43 | - |

Образец № 1 – Сыр «Голландский» до сушки

Образец № 2 – Сыр «Голландский» после сушки

Образец № 3 – Сыр «Костромской» до сушки

Образец № 4 – Сыр «Костромской» после сушки

Образец № 5 – Сыр «Пошехонский» до сушки

Образец № 6 – Сыр «Пошехонский» после сушки

Протокол оформил: с.н.с. НИЛ «Агрэкология»

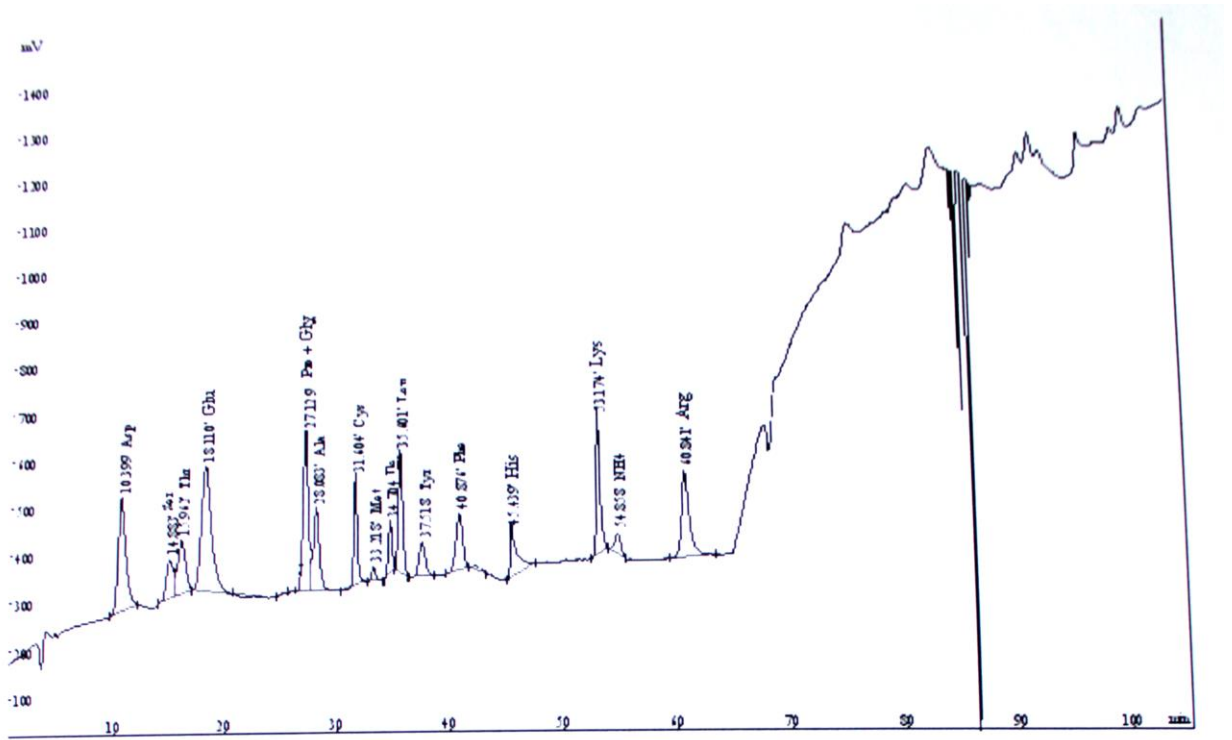
Зав. НИЛ «Агрэкология»



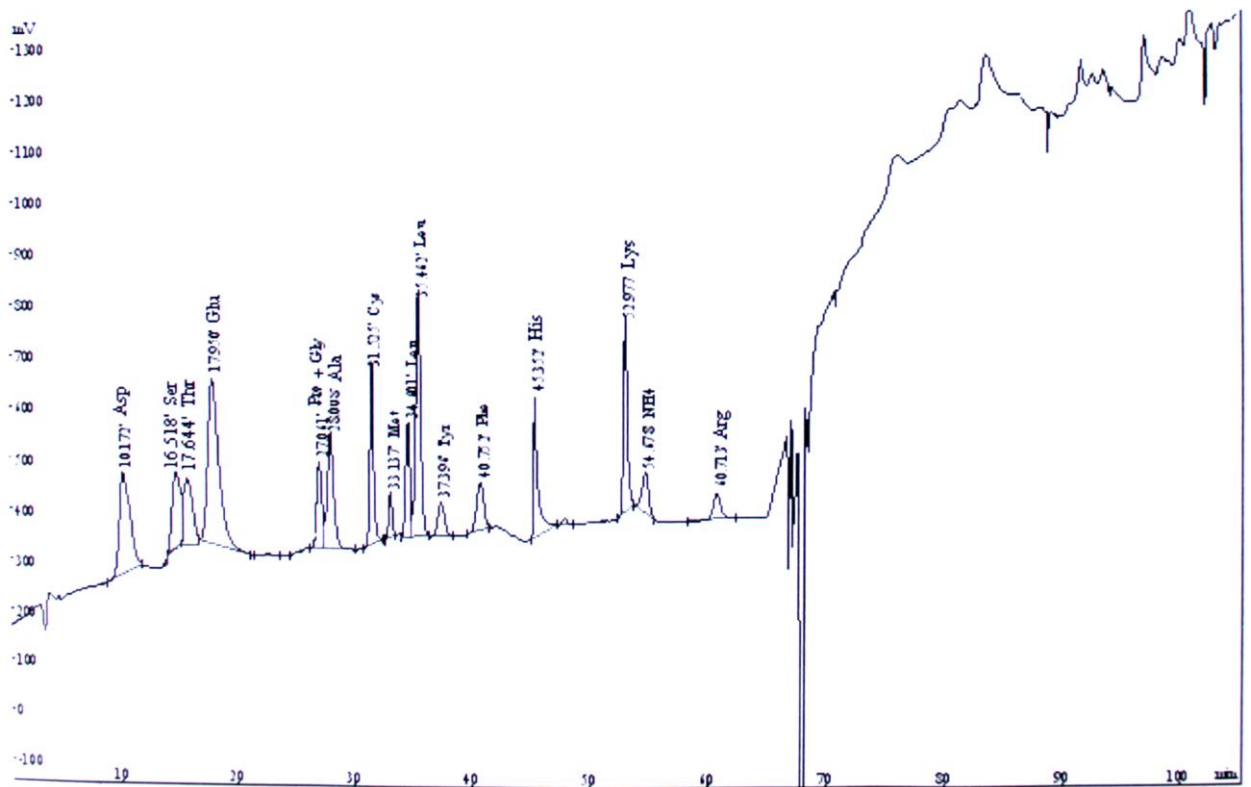
Белова Д.Д.



Харченко Е.Н.

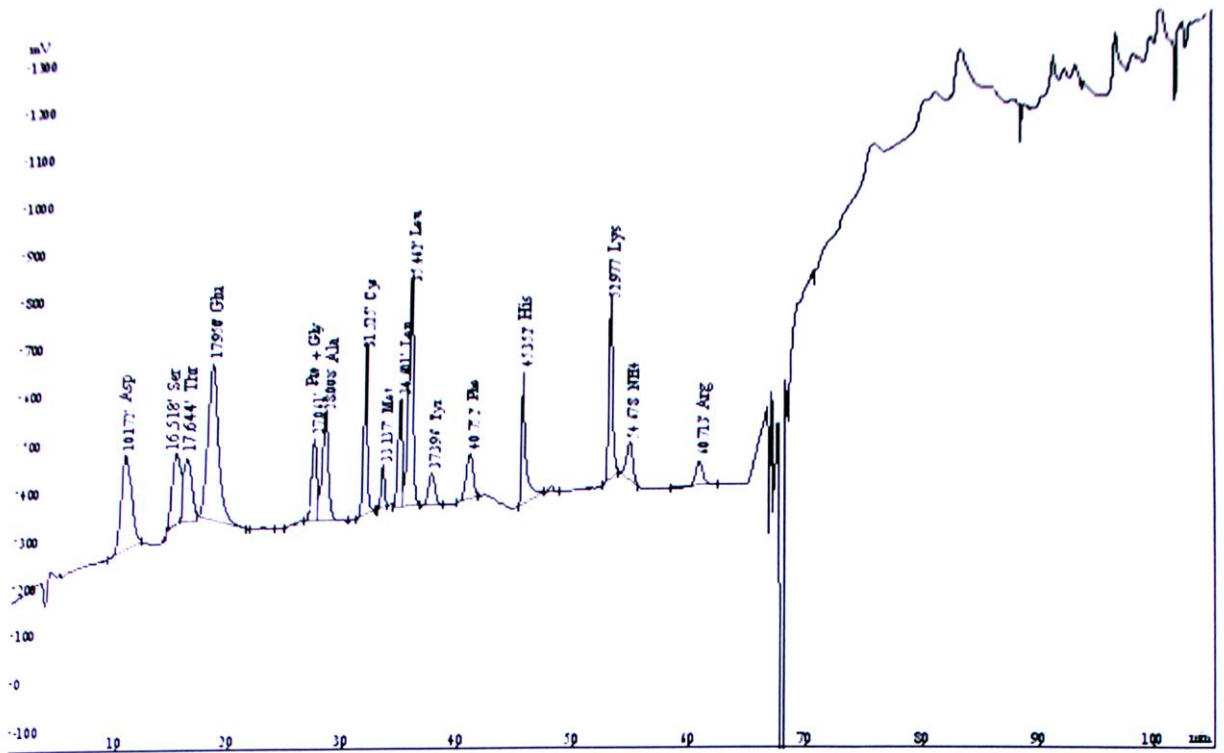


Хроматографический профиль свободных аминокислот в сыре «Голландский» до сушки

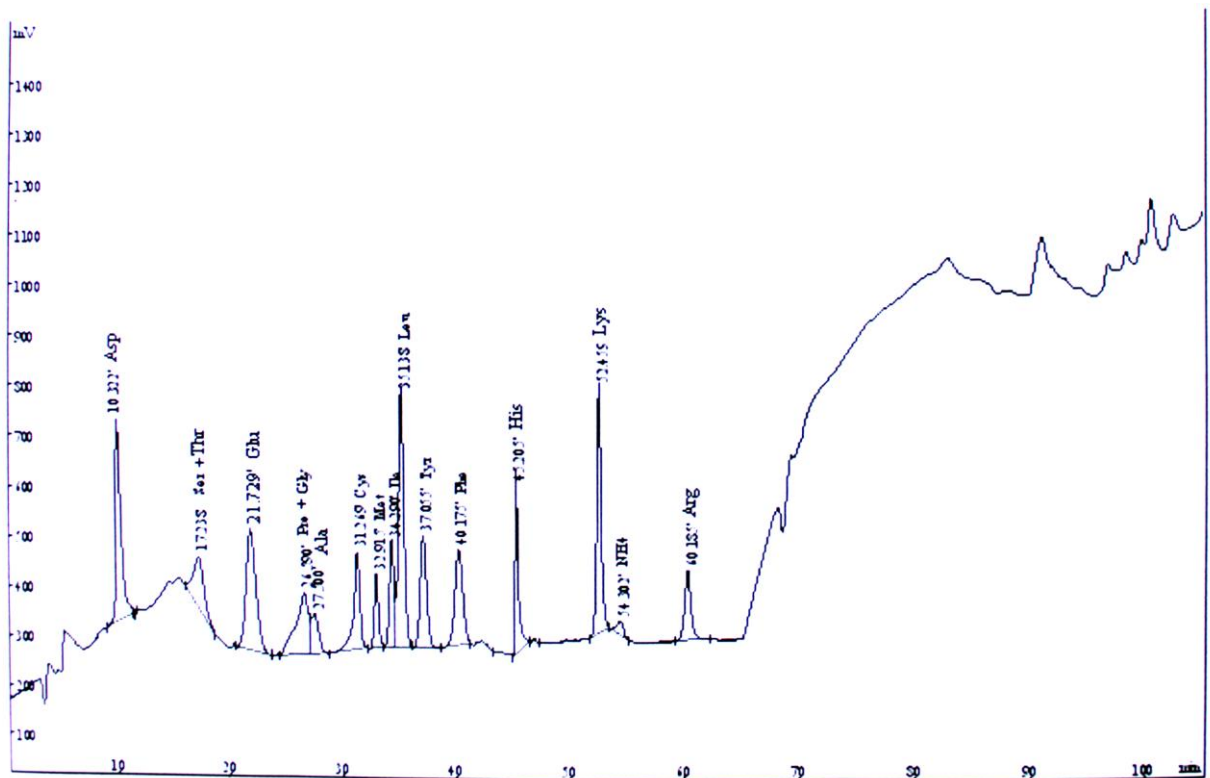


Хроматографический профиль свободных аминокислот в сыре «Голландский» после суш-

ки

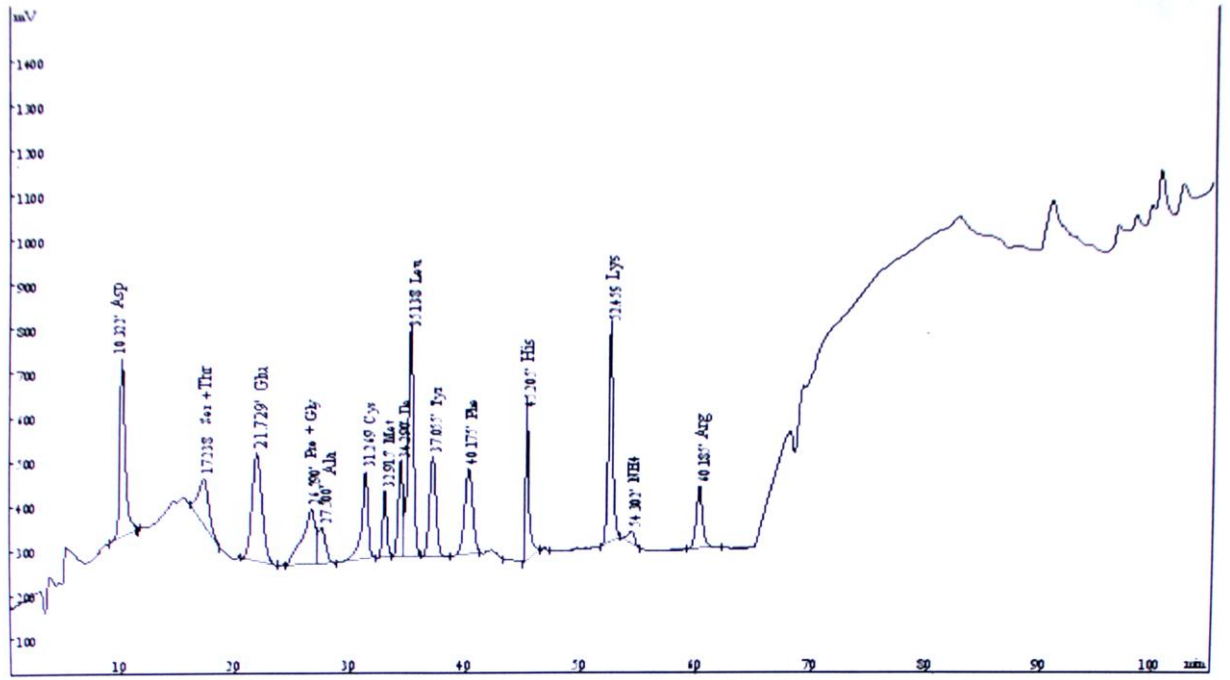


Хроматографический профиль свободных аминокислот в сыре «Костромской» до сушки

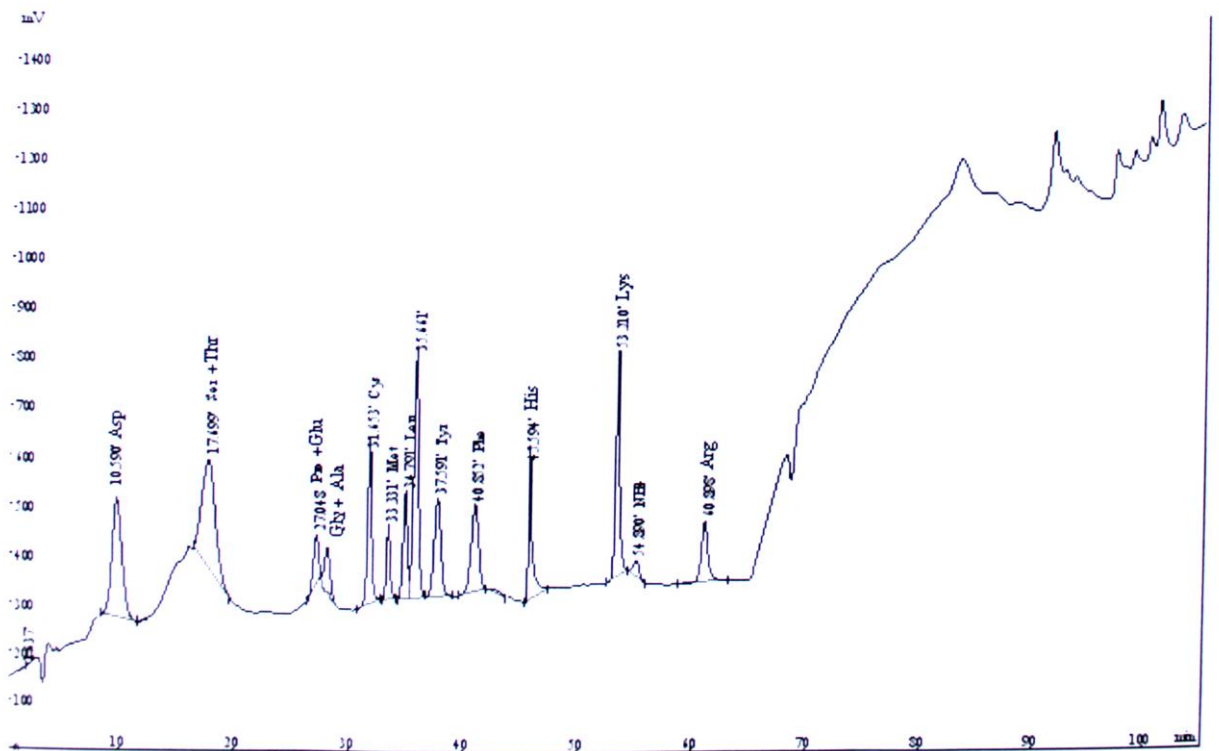


Хроматографический профиль свободных аминокислот в сыре «Костромской» после суш-

ки



Хроматографический профиль свободных аминокислот в сыре «Пошехонский» до сушки



Хроматографический профиль свободных аминокислот в сыре «Пошехонский» после сушки