

Федеральное государственное казённое военное образовательное  
учреждение высшего образования «Военная академия материально-  
технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева»  
Министерства обороны Российской Федерации

*На правах рукописи*



**СЫЗРАНЦЕВ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ**

**МОДЕРНИЗАЦИЯ АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА ОБОГАЩЕННОГО ХЛЕБА  
В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ**

4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, доцент  
Романчиков С.А.

Санкт-Петербург – 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                                       | 4  |
| Глава 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ХЛЕБА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ ....                                                         | 16 |
| 1.1 Кластеризация проблем модернизации технологических процессов производства полноценных продуктов питания в особых условиях .....                                  | 16 |
| 1.2 Оценка современных рецептов, технологии и аппаратного обеспечения производства хлеба в особых условиях .....                                                     | 22 |
| 1.3 Обоснование задач и направлений модернизации аппаратного обеспечения производства хлеба на основе эффектов синергии физических полей .....                       | 37 |
| 1.4 Анализ технических решений модернизации аппаратного обеспечения производства хлеба в особых условиях .....                                                       | 43 |
| Выводы по главе .....                                                                                                                                                | 50 |
| Глава 2 АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОБОГАЩЕННОГО ХЛЕБА В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ .                 | 51 |
| 2.1 Обоснование физических принципов и аналитических моделей корректировки рецептов производства хлеба для обеспечения населения нутриентами в особых условиях ..... | 51 |
| 2.2 Математическая модель модернизированной рамной мешалки электромагнитного и акустического действия для производства обогащенных белково-жировых эмульсий .....    | 64 |
| 2.3 Математическая модель модернизированной пекарной камеры электромагнитного и акустического действия для выпечки обогащенного хлеба в особых условиях .....        | 72 |
| Выводы по главе .....                                                                                                                                                | 90 |
| Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОБОГАЩЕННОГО                                                            |    |

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ХЛЕБА В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ .....                                                                                                                                                                       | 92  |
| 3.1 Обоснование целей и задач экспериментальных исследований.<br>Планирование натурного и вычислительного экспериментов .....                                                                       | 92  |
| 3.2 Результаты экспериментальных исследований работоспособности<br>модернизированного аппаратного обеспечения электромагнитного<br>действия производства обогащенного хлеба в особых условиях ..... | 102 |
| 3.3 Обоснование технических характеристик модернизированного<br>аппаратного обеспечения электромагнитного действия производства<br>обогащенного хлеба в особых условиях .....                       | 110 |
| Выводы по главе .....                                                                                                                                                                               | 115 |
| Глава 4 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ<br>АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОБОГАЩЕННОГО<br>ХЛЕБА В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ .....                                                                   | 116 |
| 4.1 Общие принципы оценки эффективности модернизированного<br>аппаратного обеспечения производства обогащенного хлеба в особых<br>условиях .....                                                    | 116 |
| 4.2 Оценка технико-экономической эффективности модернизированного<br>аппаратного обеспечения электромагнитного действия производства<br>обогащенного хлеба в особых условиях .....                  | 125 |
| 4.3 Практические рекомендации по применению результатов исследования<br>.....                                                                                                                       | 129 |
| Выводы по главе .....                                                                                                                                                                               | 130 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                                                                                    | 132 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                                                                                                                                             | 135 |
| Приложение А. Влияние инфракрасного излучения на процесс<br>приготовления продуктов питания .....                                                                                                   | 156 |
| Приложение Б. Копии актов внедрения и реализации .....                                                                                                                                              | 156 |
| Приложения В. Копия ТУ на хлеб и хлебобулочные изделия .....                                                                                                                                        | 162 |

## ВВЕДЕНИЕ

В целях реализации Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации, Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года, Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, Стратегии повышения качества пищевой продукции до 2030 года, [126] Стратегии национальной безопасности в соответствии с Указом Президента РФ от 26.10.2020 г. № 645 (ред. от 27.02.2023 г.) [131] требуется «разработка мер профилактики заболеваний ... и реализация комплекса мероприятий, направленных на формирование у граждан приверженности к здоровому образу жизни, включая их мотивацию к переходу на здоровое питание», «... повышение доступности качественного общего образования и обеспечение условий для организации дополнительного образования детей, в том числе в населенных пунктах, расположенных в удаленных местностях ...», «... устранение негативных последствий для окружающей среды хозяйственной и иной деятельности человека, рисков причинения вреда здоровью населения...», «...определение системы социальных гарантий, предоставляемых гражданам Российской Федерации, которые работают и проживают в Арктической зоне...», «...создание системы государственной поддержки завоза в населенные пункты, расположенные в отдаленных местностях, топлива, продовольствия и других жизненно необходимых товаров ...» [131].

Выполнение основных задач в сфере развития науки и технологий в интересах решения указанных проблем обеспечивается путем реализации следующих мер:

а) «...выделение приоритетных направлений научно-технологического развития и наращивание деятельности по проведению фундаментальных и прикладных научных исследований...» [31-35, 38, 90];

б) «...разработка и внедрение технологий, имеющих критически важное значение ... в том числе обеспечение ... разработки технологий сбережения здоровья и увеличения продолжительности жизни населения ...»;

в) «...выявление, оценка и учет объектов накопленного вреда окружающей среде и организация работ по ликвидации накопленного вреда окружающей среде...» [131];

г) «...минимизация сбросов в водные объекты загрязняющих веществ при осуществлении хозяйственной ... деятельности»;

д) «...предотвращение негативных экологических последствий при освоении природных ресурсов...» [76, 106-109].

Обобщение этих задач, перечисленных в указанных законодательных документах, позволяет сформулировать понятие «территорий осуществляющих деятельность в особых условиях<sup>1</sup>» и, как одно из важнейших требований, накладываемых на их жизнедеятельность обеспечение проживающего на них населения полноценным питанием, включающим, при необходимости, пищевые добавки компенсирующие недостаток наиболее важных пищевых веществ, отсутствующих в соответствующем местном сырье, и ликвидацию возможного проявления вредных веществ в процессе переработки используемых растительных и пищевых ресурсов.

Правильно организованное питание это один из главных факторов укрепления здоровья, физического развития и профилактики населения, его устойчивости к различным нагрузкам и воздействиям в повседневной обстановке, а также восстановления сил в период заболевания или после полученных травм [121,122].

---

<sup>1</sup> В исследовании к особым условия относятся: военные действия; функционирование в холодном и жарком климате, горной и пустынной местности; повышенные требования к военнослужащим при выполнении специальных задач; факторы риска; усложнение функций выполнения задач военнослужащим; расширение диапазона скоростей управляемых процессов; увеличение темпа деятельности; дефицит времени на выполнение требуемых действий; сложная динамика изменения функциональных состояний. ограничение двигательной активности, нарушение суточных и околосуточных ритмов; ограниченные запасы продовольствия и пресной воды, отсутствие предприятий местной производственно-экономической базы с другой.

Полноценное питание влияет на снижение продолжительности реабилитации, а значит, в целом и на повышение работоспособности после перенесенной травмы или заболевания. Своевременное доведение до организма человека требуемых нутриентов, в частности белков, жиров, углеводов, липидов, витаминов, микро- и макроэлементов, оказывает положительный эффект на течение обмена веществ. Это способствует усилению репаративных процессов и ускоряет восстановление нарушенных структур и функций организма, а также нормализует функциональное состояние организма, физическую и умственную активность [126]. Необходимо отметить, что полноценному питанию отводится особая роль в условиях компактного обособленного проживания потребителей, например, при освоении новых территорий в районах Крайнего Севера, Арктики, геолого-разведочных партий, на предприятиях, работающих в режиме вахтового метода, в горячих точках и других [126].

В связи с требованиями предъявляемому к полноценному питанию отводится особая роль в условиях компактного обособленного проживания потребителей необходима разработка нового технического оборудования для обеспечения потребителей продуктами питания в процессе выполнения задач по предназначению в специфических условиях проживания [32, 33]. Решение этой задачи может основываться на достижениях современных технологий, используемых в пищевых производствах и машиностроении.

Ранее выполненные исследования А.Н. Барышникова, М.М. Благовещенской, Е.И. Верболоз, А.С. Гинзбурга, В.В. Касаткина, Л.И. Кузнецовой, М.С. Краснова, Б.А. Кулишова, А.В. Кондратов, Н.И. Краснопевцева, Г.О. Магомедова, В.И. Маклюкова, Л.Н. Малахов, А.Г. Новоселова, А.Н. Острикова, А.Н. Пономарева, Я.Г. Островского, И.А. Рогова, В.В. Рыжова, А.П. Савельева, Г.А. Сидоренко, И.М. Скурихина, З.Н. Хатко, Д.И. Ялалетдиновой, J.C. Bakera, B. Zononi, M.N. Lund, Y. Wang, и других [16, 17, 20, 25, 45, 49, 53, 55, 59, 61, 64, 65, 73, 77, 78, 79, 89, 93, 98, 99, 101, 104, 132, 145, 146, 157, 160, 163] внесли существенный вклад в

теорию и практику изучения влияния различных энергетических полей в целях использования их в технологических процессах приготовления пищи, в частности в производстве хлебопродуктов. Основоположниками научных рекомендаций по разработке технологии производства хлеба с применением электроконтактного способа выпечки являются Л.Я. Ауэрман, Я.Г. Островский, Г.А. Сидоренко, Г.И. Шевелевой и другие. [15, 77, 100, 138].

По результатам исследований авторов, таких как Э.В. Абушинова, Н.А. Ермошина, В.Л. Кретовича, О.И. Николюк, О.И. Парахиной, А.Н. Пономарева, А.Н. Шаронова, И.П. Юхника и других [1, 41, 57, 69, 78, 79, 88, 137, 140], разработаны образцы нового технологического оборудования и процессы приготовления пищи в особых условиях, которые не всегда учитывают особенности приготовления полноценной пищи.

Исследования Г.В. Алексеева, А.Х.Х. Нугманова, И.А. Рогова, С.А. Романчикова, В.А. Тутельяна, А.В. Федорова и других [8, 74, 94, 95, 96, 129, 130, 136] легли в основу обоснования физиологических потребностей при различных заболеваниях в витаминах и макро- и микроэлементах, а также механизмов действия различных нутриентов на организм человека в ходе профилактики заболеваний. Результаты их работ доказывают, что питание является неотъемлемой частью комплексной терапии больных или травмированных людей. Пища с сохранением высокого уровня нутриентов и минимальным количеством в продуктах меланоидинов и канцерогенов предотвращает развитие осложнений, ускоряет заживление травм и восстановление нарушенных функций [119].

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых разработке аппаратного обеспечения для производства хлеба, имеющиеся аппараты не обеспечивают возможность производства обогащенного хлеба (минеральными веществами, пищевыми волокнами и т.д.) ускоренным способом требуемого качества, в условиях закрытого или ограниченного пространства, для питания населения особых условиях.

Указанные обстоятельства свидетельствуют о наличии противоречия между потребностью организации производства обогащенного хлеба и отсутствием аппаратного обеспечения для организации питания небольшого количества людей в указанных условиях, а также научно-методических подходов модернизации их конструкций и процессов эксплуатации [125,126].

Этим определяется актуальность темы диссертации и цель ее разработки.

**Цель исследования** – повышение эффективности производства обогащенного хлеба в особых условиях, за счет модернизации аппаратного обеспечения электромагнитного и акустического действия для смешивания нетрадиционного сырья и выпечки готовых изделий.

**Научная задача** исследования заключается в обосновании модернизации аппаратного обеспечения электромагнитного и акустического действия производства обогащенного хлеба в особых условиях проживания населения, на основе методологии и методов электрофизики, газодинамики, теории машин и механизмов, физико-химического анализа, методов исследования операций и процессов, теории планирования эксперимента.

**Объект исследования.** Аппаратное обеспечение и процессы производства обогащенного хлеба в особых условиях.

**Предмет исследования.** Математические модели и методики обоснования модернизации параметров и технических характеристик аппаратного обеспечения производства обогащенного хлеба в особых условиях.

**Границы исследования.** Разработка научно-методического подхода обоснования использования физических полей (теплого, ультразвукового и инфракрасного) для модернизации эксплуатационных характеристик аппаратного обеспечения производства обогащенного хлеба в обособленных условиях проживания (вахтовые поселки, геолого-

разведочные партии, пункты постоянной дислокации подразделений МЧС и других силовых структур) Крайнего Севера, Арктики, удаленного таежного и горного поселения и др.

Для достижения поставленной цели определены **частные научные задачи исследования:**

1. Проанализировать существующие проблемы производства хлебобулочных изделий в особых условиях для обеспечения потребителей обогащенным хлебом;
2. Разработать методику обоснования использования воздействия физических полей в конструктивных элементах рамной мешалки и конвейерной хлебопекарной печи электромагнитного действия с устройствами автоматизированного регулирования;
3. Обосновать математические модели конструкций рамной мешалки и конвейерной хлебопекарной печи электромагнитного действия с устройствами автоматизированного регулирования;
4. Провести экспериментальную проверку возможности коррекции рецептур, модернизированного аппаратного обеспечения электромагнитного действия производства обогащенного хлеба в особых условиях;
5. Оценить технико-экономическую эффективность применения аппаратного обеспечения электромагнитного действия производства обогащенного хлеба в особых условиях.
6. Разработать практические рекомендации по применению результатов исследования.

**Научная новизна** диссертации состоит в следующем:

1. Впервые для условий компактного и обособленного проживания (вахтовые поселки, районы Крайнего Севера, Арктики и др.) системно исследованы и выявлены технологические ограничения существующего аппаратного обеспечения производства хлеба. Установлено, что оно не позволяет достичь требуемой однородности теста при использовании обогащающих добавок, а процессы тепловой обработки приводят к

значительному меланоидинообразованию и повышенным энергозатратам, что обуславливает необходимость его модернизации. (п. 20. Процессы и аппараты пищевых производств);

2. Разработана и экспериментально обоснована рецептура обогащенного хлеба на основе нетрадиционного сырья (измельченной яичной скорлупы и пектиновых волокон из топинамбура) и скорректирована технология его производства. Впервые для данной рецептуры теоретически и экспериментально подобраны технологические режимы, исключаящие негативное воздействие щавелевой кислоты на пектиновые вещества, что обеспечивает сохранение пищевой ценности продукта без снижения производительности оборудования. (п. 21. Основные технологические процессы пищевых производств и методы их исследования);

3. Предложена и научно обоснована принципиально новая конструкция рамной мешалки, модернизированная за счет интеграции магнитострикционных элементов, генерирующих ультразвуковое поле (частота  $22 \pm 1,65$  кГц, УЗД 140 дБ). Новизна конструкции, подтвержденная патентом РФ № 216005, заключается в смещении полуосей разомкнутого сердечника, что обеспечивает турбулизацию и кавитационное воздействие во всем объеме рабочей камеры и гарантирует получение высокооднородных белково-жировых эмульсий независимо от структуры ингредиентов (п. 24. Машины и агрегаты пищевых производств, исследование их динамики и взаимодействия с окружающей средой; системный подход при создании технологических линий, оценка стабильности их функционирования);

4. Разработана и смоделирована конструкция модернизированной пекарной камеры для электроконтактной выпечки с одновременным воздействием инфракрасного излучения ( $\lambda = 4-9$  мкм) и принудительной конвекцией. Впервые научно обоснованы технологические параметры, позволяющие совместить процессы интенсивного теплоподвода (электроконтактный и ИК-нагрев) для сокращения времени выпечки до 7,2 минут со значительным снижением меланоидинообразования и сохранением

нутриентов в готовом продукте. Новизна решения подтверждена патентом РФ № 214961. (п. 25. Новые принципы построения технологических процессов их и конструктивная проработка);

5. На основе комплексного применения методологий электрофизики, газодинамики и теории тепломассопереноса разработан научно-методический подход к модернизации аппаратного обеспечения. Его практическая реализация позволила создать технологическую линию с новыми принципами построения процессов, обеспечивающую:

повышение пищевой ценности хлеба (содержание пищевых волокон на 15-22 %, кальция – в 2,2 раза);

сокращение габаритных размеров оборудования в 2,1-3,3 раза;

снижение энерго- и трудозатрат на 9-17 %.

(п. 30. Продовольственное обеспечение населения, новые подходы и стратегические решения).

#### **На защиту выносятся:**

1) методика обоснования использования воздействия физических полей в конструктивных элементах рамной мешалки и конвейерной хлебопекарной печи с устройствами автоматизированного регулирования. *Научная новизна* методики состоит в обосновании конструкций рамной мешалки и конвейерной хлебопекарной печи на основе математического моделирования процессов ультразвуковых капиллярных эффектов, кавитации, инфракрасного излучения и электроконтактной выпечки с учетом изменения продолжительности созревания теста под влиянием диффузионных процессов в гидродинамическом пространстве, динамики и направления тепломассопереноса при комплексном тепловом воздействии на тестозаготовку;

2) математические модели конструкций модернизированных рамной мешалки и конвейерной хлебопекарной печи с устройствами автоматизированного регулирования. *Научная новизна* математических моделей основывается на применении физических принципов и теории

дифференциальных уравнений для исследования влияния эксплуатационных параметров газодинамических процессов теплопроводности и теплопередачи конструктивных элементов на показатели производительности рамной мешалки и конвейерной хлебопекарной печи с устройствами автоматизированного регулирования процессов функционирования;

3) результаты экспериментальных исследований возможностей коррекции рецептур, разработанных конструкций модернизированных рамной мешалки и конвейерной хлебопекарной печи с устройствами автоматизированного регулирования. *Научная новизна* результатов заключается в определении ингредиентов и технологических процессов производства функционального хлеба, а также режимов электропитания, определяемых эмпирическим путем для расчета геометрических параметров теплопроводящих каналов, с применением методов механики сплошных сред и теории теплопередачи.

**Обоснованность и достоверность** теоретических положений, выводов и рекомендаций исследования подтверждаются использованием реальных аппаратов в организации функционального питания; применением апробированных методов теоретических и экспериментальных исследований; статистической оценкой полученных результатов с заданной точностью; сходимостью результатов экспериментальных исследований с данными натурных испытаний технологического оборудования; внедрением предложенных аппаратов в практику организации функционального питания.

**Методологической основой** исследования являются результаты исследования в области научного обоснования совершенствования процессов и аппаратов приготовления пищи на основании воздействия физических полей в других отраслях пищевых производств.

**Основными методами** исследования являются методы физико-химического анализа, методы механики сплошных сред, тепло-массообменные методы, методы теории управления качеством и экономическим анализом, методы исследования операций и процессов,

теории вероятности и математической статистики и теории планирования эксперимента.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в разработке научного аппарата обоснования эксплуатационных характеристик модернизированного аппаратного обеспечения для производства хлеба на основе эффектов синергии физических полей для компактных групп населения в обособленных условиях проживания, который является дальнейшим развитием методов научного обоснования возможностей разработки новых образцов аппаратов пищевых производств на основе применения синергии полей.

**Практическая значимость** заключается в повышении эффективности применения процессов и аппаратов приготовления функционального питания для компактных групп населения в обособленных условиях проживания за счет разработки рекомендаций по корректировке рецептур, конструкций рамной мешалки и конвейерной хлебопекарной печи с устройствами автоматизированного регулирования процесса функционирования, обеспечивающих улучшение органолептических показателей на 12-16 %, повышение ее пищевой ценности готовой продукции на 15-27 %, снижение продолжительности приготовления продуктов функционального питания 1,2-5 раз и энерго- и трудозатрат на 9-17 %; меланоидинообразования и канцерогенов; в расширении ассортимента хлебобулочных изделий.

Рассматриваемая проблематика имеет прямое отношение к научной специальности **4.3.3. «Пищевые системы» (пункты 20, 21, 24, 25, 30)**, так как в ходе исследования выполнена разработка методики, математической модели и технических решений, применение которых позволит повысить эффективность процессов продовольственного обеспечения населения в особых условиях.

**Основные научные положения и результаты исследования апробированы и реализованы.** Материалы и отдельные результаты по теме диссертации докладывались на: X Всероссийской научно-практической

конференции «Актуальные вопросы материально-технического обеспечения войск национальной гвардии Российской Федерации» (г. Пермь, 18 февраля 2022 г.); X Международной научно-практической конференции «Современные проблемы цивилизации и устойчивого развития в информационном обществе» (Москва, 22 июня 2022 г.); Международном научно-исследовательском конкурсе «Молодые исследователи в ответ на современные вызовы» (г. Петрозаводск, 29 августа 2022 г.); XI научно-практической конференции с международным участием «Проблемы материально-технического обеспечения Росгвардии в современных условиях и пути их решения» (г. Пермь, 20 октября 2022 г.); Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров «Технологии, машины и оборудование для проектирования, строительства объектов АПК» (г. Курск, 15 марта 2023 г.); XXVIII Международной очно-заочной научно-практической конференции «Исследование различных направлений современной науки: естественные и технические науки» (Москва, 17 мая 2023 г.); XXX Международной очно-заочной научно-практической конференции «Современные наука и образование: достижения и перспективы развития» (Москва, 07 июня 2023 г.).

Реализованы в: практической деятельности должностных лиц ООО «Алгоритм» (акт от 12.12.2023 г.); ООО «Проектинтертехника» (акт от 23.07.2024 г.); ООО «Брасовские сыры» (акт от 25.02.2025 г.); образовательном процессе ВАМТО (акт от 14.08.2024 г.); научно-исследовательской работе Научно-исследовательского института (военно-системных исследований МТО ВС РФ) (акт от 21.08.2024 г.), что подтверждается четырьмя актами реализации и внедрения.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 22 научные работы, из них пять статей в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК Минобрнауки РФ; два патента РФ на полезные модели; два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ; 13 статей в сборниках научных трудов (международных, всероссийских) конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации с приложениями составляет 163 страницы. Диссертация содержит 21 таблицу и 41 рисунок. Список использованной литературы включает 164 наименования. Источники информации представлены наименованиями работ отечественных и зарубежных авторов.

# **ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ХЛЕБА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ**

## **1.1 Кластеризация проблем модернизации технологических процессов производства полноценных продуктов питания в особых условиях**

Качество пищи является важнейшим критерием, воздействующим на организм человека – на физическую активность и работоспособность, а также на его уровень резистентности к внешним факторам.

Известно, что в условиях компактного обособленного проживания потребителей в целях ускорения адаптации организма и обеспечения его нужными нутриентами требуется соблюдение условий по организации питания с учетом особенностей функционального питания [126]. Условия проживания регламентируют и требования к пищевому рациону (по энергетической ценности, химическому составу, набору продуктов, массе и промежуткам приёма пищи). На организацию питания возлагается большая задача. Оно должно быть не только полноценным, но и рациональным, сбалансированным, с учетом факторов трудовой деятельности потребителей и условий их проживания. Особенности проживания коллективов имеют ряд особенностей, связанных с удалением от мест пополнения запасов, ограниченностью людских, энерго- и материальных ресурсов, жилого и технологического пространства для приготовления и приема пищи.

Под технологическим оборудованием приготовления пищи понимают пищевые аппараты, обеспечивающие приготовление горячей пищи, а также производство хлеба. Под функциональным питанием в исследовании понимаются продукты, которые употребляются в пищу ежедневно и обогащены минеральными веществами, при минимальном содержании канцерогенов и мелоидообразований в условиях усиления репаративных

процессов и восстановления нарушенных структур и функций организма, а также нормализации функционального состояния организма, физической и умственной активности.

Полноценное питание оказывает большое влияние на обмен веществ и общее состояние организма, повышает устойчивость к влиянию различных неблагоприятных факторов окружающей среды и направлено на предотвращение развития осложнений и хронических заболеваний, ускорение заживления ран и сокращение сроков восстановления работоспособности [37].

Можно сказать, что полноценное питание это главенствующий элемент комплексной терапии и адаптации, не только травмированных или больных членов коллектива, но и тех, кто осуществляет повседневную напряженную трудовую деятельность. Оно характеризуется большим последствием на метаболизм и общее состояние организма. Благодаря быстро скорректированному и адекватному в зависимости от ситуации питанию во время адаптации возможно сокращение риска развития осложнений, перерастающих затем в хронические заболевания. Верно подобранные пищевые нутриенты ускоряют заживление ран и сокращают период восстановления организма после болезни.

Синтетические лекарственные средства не усваиваются организмом в достаточном для профилактики количестве и могут вызывать аллергию. Наряду с ними в средствах натурального происхождения биологически активные вещества находятся в равных, а зачастую и в превышающих в лекарственных веществах синтетического происхождения долях [111,160]. Так, многие питательные вещества, входящие в состав пищевых продуктов, оказывают функциональное воздействие благодаря своим бактерицидным, противовоспалительным и регенерирующим свойствам [112,147].

В особых условиях набор продовольствия в рационе потребителей должен обеспечивать сбалансированное питание.

Несмотря на большое количество продуктов питания, хлеб остается незаменимым видом продовольствия и используется во всех регионах проживания людей. Хлеб занимает основное место по массе и пищевой ценности в суточном рационе, несмотря на то что для его производства из муки требуется более 5 часов.

Доказано, что отсутствие в рационе необходимого количества микро- и макронутриентов в особых условиях отрицательно влияет на здоровье большей части населения. Их недостаточность является основной причиной развития и распространения хронических неинфекционных заболеваний (атеросклероз, инсулинозависимый диабет, ожирение, артериальная гипертензия, метаболическая иммунная резистентность, аутоиммунные заболевания, заболевания опорно-двигательного аппарата, онкологическая патология и т. д.). Недостаток эссенциальных макро- и микроэлементов занимает первое место среди причин болезней и смертности. Основной причиной этого является снижение количества макро- и микроэлементов в пищевых продуктах, входящих в ежедневный рацион [86].

Следует отметить, что хлеб и хлебобулочные изделия с несбалансированным аминокислотным, минеральным и белково-углеводным содержанием зачастую занимают особое место в рационе групп. Современная технология приготовления хлеба включает дополнительные добавки по рецептуре: хлебопекарное тесто, клейковину, подсластители, консерванты, ароматизаторы, а также стабилизаторы, вызывающие различные виды кислотно-щелочного баланса и оказывающие негативное влияние на микрофлору кишечника.

Использование сахара в рецептуре приготовления хлеба обеспечивает высокий гликемический индекс готового продукта, что вызывает нагрузку на желудок и нежелательно для питания при некоторых заболеваниях.

Рациональное питание травмированных и больных людей, а также людей, находящихся в стрессовой ситуации, помогает сохранить высокую работоспособность, противостоять различным неблагоприятным

физическим, химическим и биологическим факторам, сократить сроки адаптации, предотвратить осложнения и успешное выздоровление.

Эффективность других звеньев функционального процесса, ход и исход ликвидации травм и заболеваний во многом зависят от полноценного питания травмированного и больного организма. Современное развитие пищевой технологии позволяет решить ряд задач при производстве пищевых продуктов без применения специальных химикатов и одновременно решить проблемы эффективного использования пищевого сырья, например при пищевой переработке вторичных источников питания с использованием новых технологических средств. Это тем более важно, поскольку извлечение из него ценных компонентов, таких как пищевые волокна, инулин и пектин, может оказаться ценным для преодоления экологических проблем, связанных с загрязнением окружающей среды и ростом связанных с этим заболеваний [125].

Такие подходы подходят для решения текущей задачи дальнейшего совершенствования рецептур полноценного питания. Одним из очевидных решений в этой ситуации является увеличение потребления пищевых волокон. В качестве такого вида клетчатки пектин, как полисахарид присутствуют почти во всех растительных материалах. Благодаря сочетанию комплексных и абсорбционных свойств пектин повышает чувствительность организма и выводит из всасывания вредные вещества. Пектиновые вещества могут найти широкое применение не только в пищевом производстве, но и в медицине и косметологии в качестве загустителей, заменителей жиров, эмульгаторов и увлажнителей [125].

В связи с этим необходимо разработать технологии производства пектина из традиционного и альтернативного сырья. Одним из таких видов сырья является топинамбур - распространенная сельскохозяйственная культура. Топинамбур богат витаминами, минералами, органическими кислотами и аминокислотами, которые не могут синтезироваться организмом человека. Некоторые трудности возникают при определении подходящего способа извлечения пектина из топинамбура. Полученные

экспериментальные испытания показывают возможность при производстве пектина замены наиболее распространенной соляной кислоты на лимонную, с последующей промывкой готового продукта горячей водой [125].

Основные вопросы полноценного питания связаны с употреблением в пищу хлеба отвечающего нормативным параметрам. Приготовление теста и выпечка такого хлеба часто осложнены несанкционированным течением реакцией меланоидообразования, возникающей в конечном процессе.

Такая реакция, называемая реакцией Майяра или карамелизации, возникает при воздействии повышенных температур на аминокислоты и сахара, содержащиеся в несанкционированных количествах в тесте в процессе выпекания хлеба. Чем дольше и более высоким температурам подвергается тестовая заготовка, тем больше меланоидинов образуется на поверхности (в корке) готового хлеба [123]. При этом, соответственно, чем дольше длится реакция, тем темнее становится цвет хлебной корки, повышается сладость и усиливается аромат изделия.

Вместе с тем, нужно отметить, что нагрев теста в печи выше 150 °C приводит к разрушению аминокислот. Также от температурного режима и продолжительности выпечки зависит интенсивность и качество прохождения реакции Майяра [123]. Например, меланоидины, выделяемые при более высоких температурах (выше 100 °C), за непродолжительное время нагрева таких компонентов теста, как глицерин и глюкоза (в течение 2 часов), содержат большее количество углерода, чем меланоидины, полученные при нагреве той же смеси при температуре 56 °C в течение 250 часов. При этом интенсивность окраски смешанных ингредиентов по окончании химической реакции может быть одинаковой.

Структурные особенности аминного компонента, такие как наличие функциональных групп, пространственная конфигурация и размер молекулы, могут влиять на скорость реакции меланоидинообразования. Например, аминные соединения с активными функциональными группами, такими как amino-, оксо- или гидроксильными группами, могут проявлять большую

реакционную активность и способность к образованию меланоидинов. Кроме того, наличие заряда в молекуле амина может также влиять на реакционную активность, например, амины с положительным зарядом могут проявлять большую активность при образовании меланоидинов [135].

Условия реакции, такие как pH и температура, также оказывают значительное влияние на интенсивность протекания реакции меланоидинообразования. Например, при более низком *pH* и повышенной температуре реакция может протекать более активно, так как это способствует образованию активных промежуточных продуктов и ускоряет химические реакции [150, 153].

Таким образом, интенсивность протекания реакции меланоидинообразования зависит как от строения аминного компонента, так и от условий реакции и может быть модулирована для достижения оптимальных результатов.

Результаты проведенных исследований [22, 48] свидетельствуют о том, что длительная и интенсивная термическая обработка может привести к значительному снижению содержания свободных аминокислот и восстанавливающих сахаров в продуктах, а также ухудшить их биологическую ценность. Поэтому при приготовлении пищи рекомендуется выбирать более щадящие (низкие температурные режимы) и короткие методы термической обработки, чтобы минимизировать потерю питательных веществ и сохранить биологическую ценность готового изделия.

Кроме того, также не последнюю роль играет необходимость тщательного перемешивания компонентов теста для равномерного распределения белково-жировых компонентов и сахаров, что обеспечивает в процессе выпечки равномерность окраски и предотвращение появления избыточного количества меланоидинов и определенного количества канцерогенов.

Таким образом, анализ организации полноценного питания потребителей в особых условиях показал, что важным является обеспечение

интенсификации производства продуктов питания, с сохранением пищевой ценности исходных компонентов и возможности корректировки ее в готовом продукте. Значительную роль по объёму в рационе и содержанию нутриентов в питании потребителей играет хлеб, процессы его производства позволяют корректировать его пищевую ценность [126]. Повышение автоматизации процесса производства и расширение функциональных возможностей аппаратов для производства хлеба в особых условиях являются в настоящее время приоритетными задачами научных исследований [126].

## **1.2 Оценка современных рецептур, технологии и аппаратного обеспечения производства хлеба в особых условиях**

Изучая топинамбур, специалисты, занимающиеся подбором ингредиентов для добавления в рецептуру выпечки полноценного состава, отмечают, что он отличается своей устойчивостью к воздействиям окружающей среды и хорошо сохраняется в различных почвенных и температурных условиях [113].

Его культивируют во многих частях мира из-за его способности адаптироваться к различным средам обитания и устойчивости к биотическим и абиотическим стрессам. Помимо своей твердости, растение также известно своей ценностью в качестве биомассы, используемой в биомедицинской и химической промышленности. В различных частях растения (стебли, листья, цветы и корни) присутствуют разные фитохимические вещества, такие как фенолы, флавоноиды, кумарины, ненасыщенные жирные кислоты, производные полиацетилена, сесквитерпены, белки, аминокислоты, сахара, [125] органические кислоты, лактоны, сердечные гликозиды, терпеноиды, линолевая,  $\alpha$ -линолевая кислота и инулин [41, 141, 150, 152].

После проведения масс-спектропии обнаружено, что группы белков могут дублироваться в двух из трех повторов (2102 группы белков) с использованием трех разных образцов. Эти белки часто дополнительно

анализируются исследователями в разных странах [139]. В таблице 1.1 показано общее количество белков в каждом образце [125].

Таблица 1.1 – Количество белков в образце с коэффициентами кратности [125]

| Образец | Вид 1 | Вид 2 | Вид 3 | Общие белки во всех повторях | Стандартное отклонение | Коэффициент репликации | Коэффициент вариации |
|---------|-------|-------|-------|------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 1       | 1917  | 1966  | 1955  | 1780                         | 25,71                  | 0,915                  | 8,5                  |
| 2       | 1901  | 1898  | 1920  | 1732                         | 11,93                  | 0,909                  | 9,1                  |
| 3       | 1887  | 1917  | 2439  | 1701                         | 31,0                   | 0,817                  | 18,26                |

Анализ экспериментальных исследований в области повышения пищевой ценности продуктов питания показал, что пектин топинамбура возможно использовать в различных биотехнологических процессах, таких как производство пищевых добавок, фармацевтических препаратов, косметических средств и др. Благодаря своим свойствам пектин топинамбура может быть использован в качестве эффективного комплексообразователя для удаления токсических веществ и тяжелых металлов из воды и почвы. Его высокая водорастворимость облегчает его использование в процессах ферментации и биохимического синтеза. Пектин топинамбура имеет лечебные свойства и может быть использован в медицине для лечения заболеваний желудочно-кишечного тракта, а также для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний. Выводы этих исследований подтверждают большой потенциал пектиновых веществ, выделенных из корней топинамбура, в различных отраслях науки и промышленности. Пектин, полученный из топинамбура, лучше связывает и удерживает влагу и другие ингредиенты в пищевых продуктах в шесть раз сильнее, чем пектин, полученный из традиционного сырья, такого как яблочные выжимки или кожура цитрусовых [124]. Это делает пектин из топинамбура более эффективным и полезным ингредиентом для использования в пищевой промышленности, особенно при производстве продуктов с высоким содержанием влаги, таких как джемы, повидло и соусы. Кроме того, пектин

из топинамбура может быть также использован в фармацевтической и косметической промышленности для создания гелирующих и стабилизирующих свойств в продуктах, по мнению авторов [38, 45, 97, 154, 161, 162, 164].

Исследования, проведенные казахстанскими учеными по определению пектиновых веществ, выделенных из топинамбура (*Helianthus tuberosus*), с использованием физических и химических методов (элементный анализ, ИК-спектроскопия, ЯМР-спектроскопия), показали, что выход из сырья, выращенного в Карасайском районе, составил 17-18 %, а в Мактааральском районе 20-21 %.

По данным автора [161, 164], анализ пектина, полученного методом экстракции топинамбура раствором лимонной кислоты, показал улучшение его прежних физико-химических свойств, характеризующихся более высокой детоксикационной активностью (уронидный компонент ( $85,3 \pm 1,1$  %), степень этерификации ( $7,2 \pm 0,3$  %), содержание свободных карбоксильных групп ( $41,4 \pm 0,3$  %) и прочность связи ионов свинца ( $310,8 \pm 3,8$  мг/г). Так, разные данные, полученные авторами в результате исследований топинамбура, показывают, что содержание пектина очень велико, однако о методах его экстракции в литературе имеются лишь частичные сведения [125].

Успешное решение подобных задач связано с новым или усовершенствованным традиционным технологическим оборудованием и базируется на всестороннем знании различных физических и химических эффектов в существующих конструкциях, при изменении условий их эксплуатации, технологических характеристик.

К числу новых образцов оборудования относятся реакторы, использующие электромагнитные эффекты, генерируемые магнитострикционными элементами при определенных режимах их работы.

В качестве примера можно рассмотреть работу одного из таких реакторов [13], схема которого приведена на рисунке 1.1. [84].

Работает реактор следующим образом. При загрузке под давлением обрабатываемого продукта внутрь корпуса 2, установленного на основании 1, герметически закрытого верхней крышкой 3 при помощи болтов 5 с отверстиями 4, он попадает в зазор между наружным цилиндрическим стрикционным элементом 6 и внутренней поверхностью корпуса, где подвергается воздействию ультразвуковых колебаний генерируемых элементом 6 и отражаемых стенкой корпуса 2.

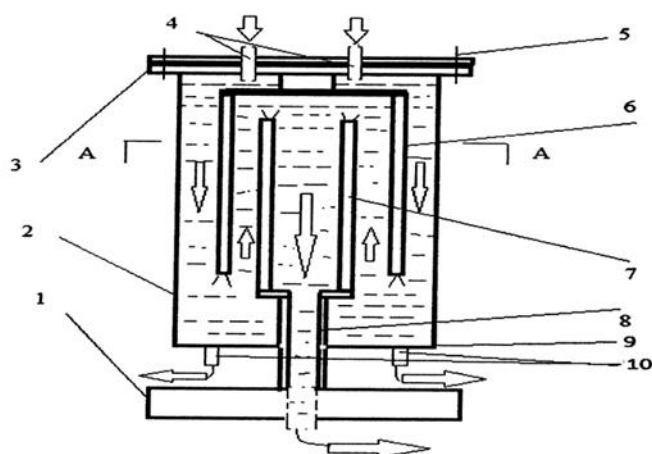


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема реактора для экстрагирования пектина:  
 1 – основание; 2 – корпус; 3 – верхняя крышка; 4 отверстие; 5 – болт;  
 6, 7 –магнитострикционные элементы; 8 – проводник; 9 – нижняя крышка;  
 10 – патрубок

Опускаясь вниз в направлении нижней крышки 9, продукт достигает нижнего среза элемента 6, где подвергается сосредоточенному воздействию ультразвука и разворачивается в направлении верхней крышки 3. Далее, проходя между поверхностями магнитострикционных элементов 6 и 7, установленным с зазором равным 0,10-0,15 внутреннего диаметра внешнего коаксиального магнитострикционного элемента, поток подвергается воздействию ультразвука генерируемого с обеих сторон. Разворачиваясь под действием верхней крышки 3 в противоположном направлении, продукт оказывается под действием ультразвуковых колебаний, генерируемых элементом 7 внутри полости заполненной обрабатываемым продуктом. Завершая обработку в реакторе, продукт через отверстие, выполненное по

оси проточной камеры, удаляется из нее для участия в последующих циклах переработки. В случае накопления высококонцентрированного продукта в нижней части корпуса 2, он удаляется через отверстия 9, которые одновременно могут быть использованы при санитарно-гигиенической обработке корпуса.

Аналогичные механизмы используют при перемешивании ингредиентов теста, в состав которого входят пектин и другие обогащающие добавки, в том числе минеральные, например, на основе измельченной яичной скорлупы.

Наиболее эффективной в этом случае может оказаться рамная мешалка, содержащая корпус, вал со ступицей и лопасти, закрепленные на ней, причем лопасти выполнены в виде разомкнутого сердечника магнитострикционного устройства как отрезков ферромагнитных труб, на каждом из которых размещены электромагнитные катушки представленные на рисунке 1.2. [91, 126].

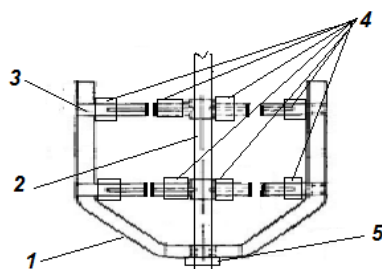


Рисунок 1.2 – Рамная мешалка:

1 – ступица; 2 – вал; 3 – отрезки труб; 4 – электромагнитные катушки;  
5 – гайка

Такая рамная мешалка работает следующим образом.

При включении электродвигателя центр рамной мешалки перемещается. Лопасти в виде отрезков труб создают вращательное движение жидкости в машине. Белково-жировая композиция перемешивается и разделяется на несколько слоев по высоте рамного миксера. При вращении рамного смесителя через каждый такой слой за счет зазора между валом и секциями трубки концентратора создается

крутящий момент, который заставляет поток внутри слоя вращаться и образовывать вихревой шнур. Далее слои перемешиваются по высоте. При включении мешалки электроимпульсы подаются на электромагнитные катушки, установленные на оси 2 и ступице 1, с определенным промежутком времени. Пара электромагнитных катушек 4, которые являются магнитострикционным устройством с искривленным сердечником из-за зазора, начинают генерировать кавитационные волны. Изгиб сердечника создает условия для распространения кавитационных волн как в окружном, так и в радиальном направлениях. Это позволяет перемешивать композицию не только в плоскостях, где расположены магнитострикционные устройства, но и после взаимодействия этих волн со стенками корпуса, охватывая всю объемную часть установки. Затяжка гайкой 5 обеспечивает надежную фиксацию угла размещения плоскостей, где размещены отрезки магнитопровода. Это позволяет сохранять желаемый угол и обеспечивает правильную ориентацию волн и перемещение композиции в установке.

Представления о возможности совершенствования формирования свойств, например хлеба, дают основные сведения об устройстве применяемого для выпечки. Введение новых ингредиентов, при этом, в состав рецептур хлебобулочных изделий должно осуществляться с необходимым согласованием новых рецептур с возможностями соответствующего технологического оборудования для приготовления и выпечки теста.

Оборудование для выпечки хлебобулочных изделий классифицируется по нескольким критериям:

технология, определяющая ассортимент выпускаемой продукции (универсальный или ограниченный);

способ получения тепла для печи (может быть индивидуальным с одним или несколькими топочными устройствами);

централизованный способ получения тепла (газа или электричества для нескольких топочных устройств одновременно).

Различные способы разогрева хлебобулочных изделий описаны в научной и учебной литературе [23,24,27,55, 81-83].

Хлебопекарные печи делятся на подовые, в которых топливо сжигается в пекарной камере, с теплопередачей пара с помощью нагревательных трубок (трубок Перкинса); со смешанным отоплением (с паровыми трубами и воздуховодами); с конвективным нагревом (в пекарной камере циркулирует нагретый воздух). Производители хлебопекарного оборудования особое внимание уделяют духовкам: с электронагревом, инфракрасным обогревом, путем нагревания токами СВЧ и др. Современные разработки и модернизации в основном касаются дополнительной механизации отдельных агрегатов: печи, конвейера и разработке новых цепных, пластинчатых и люльковых конвейеров для печей; исследований и разработке новых материалов для печей с ленточным или сетчатым (стальная лента, сетчатая лента) приводом [68, 69].

Учитывая особенности особых условий, остановимся подробнее на небольших хлебопечках с электрическим нагревом.

Схема модернизированной малогабаритной хлебопекарни с электрообогревом МХПЭМ представлена на рисунке 1.3. Она состоит из трех хлебопекарных секций, установленных одна над другой на одном основании и работающих независимо друг от друга, пульта управления и щита управления.

Шкаф расстойный 2 представляет собой сварной ящик из нержавеющей стали с двустворчатыми дверцами и замком спереди. Внутри шкафа расположены две ярусные стойки с направляющими для размещения заготовок.

Печь 1 сварена в виде стального короба повышенной жаростойкости. С одной стороны открывается и представляет собой площадку для загрузки теста, дверь закрывается на замки. Перед дверью внутри пекарной камеры устроен экран, который запирается вместе с дверью.

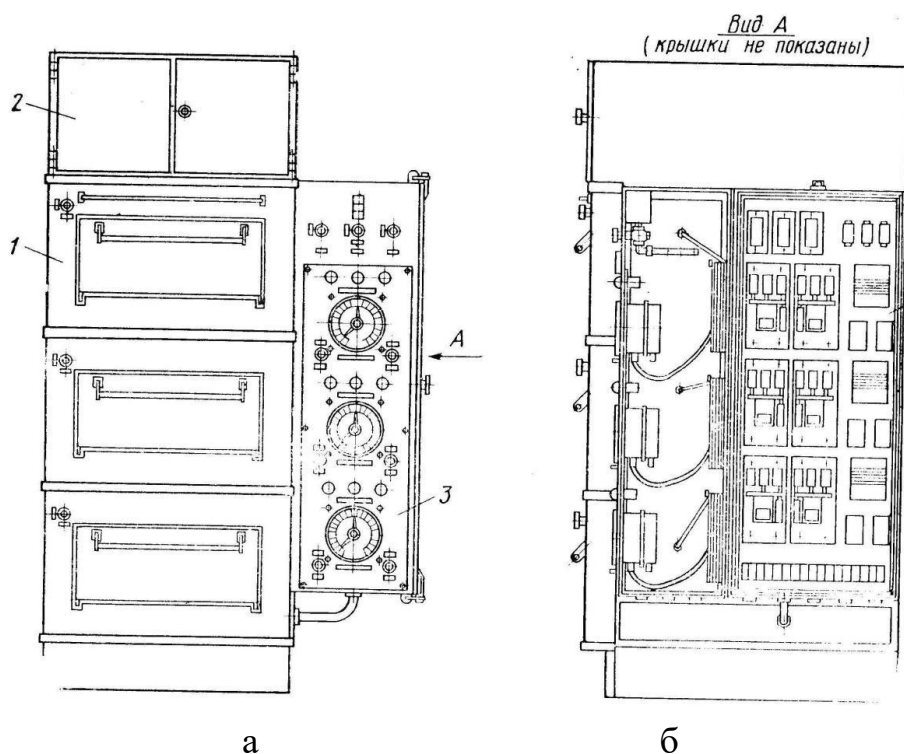


Рисунок 1.3 – Модернизированная малогабаритная хлебопекарная печь с электрическим обогревом МХПЭМ:  
а – вид спереди; б – вид сзади; 1 – пекарная секция; 2 – расстойный шкаф;  
3 – пульт управления; 4 – щит управления

В верхней и нижней частях установлены электронагреватели (нагревательные элементы). Под нижними нагревательными элементами расположен поддон для испарения подаваемой воды при увлажнении камеры при выпечке пшеничного хлеба. Вода подается через сливную трубу, соединенную с резервуаром для воды.

На боковой стене печи проходит труба с задвижкой, подключаемая к общему газоотводу печи. Ручка заслонки расположена на передней стороне духовки.

Температура каждой пекарной камеры регулируется независимо, с помощью манометрических термометров, установленных в пекарных камерах печи и соединенных капиллярами с корпусом оборудования, установленным на лицевой панели управления.

Пульт управления 3 представляет собой сварную конструкцию из профилированной стали. Консоль оборудована запирающейся дверцей.

Лицевая часть панели управления выполнена в виде панели, на которой расположены манометры-термометры, устройства сигнализации и коммутационные устройства для контроля работы печи. Внутри консоли расположены три водопроводных счетчика воды с кранами.

Зеркало счетчика воды и ручки смесителя расположены на лицевой стороне панели управления.

Электрооборудование духовки расположено внутри панели управления 4 и снабжено съемной крышкой с замками. Размещено в устойчивом к царапинам дизайне.

В нижней части печи для заземления предусмотрены латунная гайка и латунный болт с шайбой. Место установки болта обозначается «землей». В зависимости от компоновки панели управления духовка доступна в левом и правом исполнении.

Каждая хлебная секция духовки работает независимо друг от друга. Установка оснащена автоматической системой поддержания температуры.

Во время работы пекарной камеры нагревательные элементы в ней накаляются и, следовательно, осуществляется нагрев парогазовой среды в пекарной камере. После нагрева печи до температуры 220-230 °С формы с расстойным тестом ставят в камеру, предварительно открыв дверцу. После размещения расстойных тестозаготовок в печи на испаритель добавляется дозированное количество воды и создается режим водяного пара.

По окончании выпекания дверцу духовки открывают и вынимают испеченный хлеб в формах. Хлеб вынимают из форм и размещают на стойки. Известны и другие конструкции духовок с электрообогревом.

В настоящее время хлебопекарные электрические печи получают все большее распространение, поскольку они обладают более точным и стабильным режимом нагрева, что позволяет достичь более высокой точности в выпечке хлеба. В век стремительного развития цифровых технологий замена устаревших печей на электрические является логичным шагом для современных хлебозаводов. Благодаря объединению

традиционных технологий хлебопечения и современной цифровизации именно при использовании электрических печей на производстве возможны не только автоматизация, но и компьютеризация отрасли. Такая модернизация позволит совместить экономические, экологические и технологические преимущества от внедрения.

Сравнительные параметры некоторых видов печей представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры электрических хлебопекарных печей [56, 67]

| Показатели                                                                                     | Характеристики хлебопекарных печей |                |                |                 |                |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
|                                                                                                | МХПЭ                               | ХПЭ-2          | ХПЭ-3          | ПХПЭ-5          | П-503          | ЛППП-53        |
| Производительность печи за один подоробот на хлебе, кг<br>Ржаном<br>Пшеничном: I сорт/ II сорт | 36<br>27/27                        | 72<br>54/24    | 108<br>81/81   | 10,8<br>6,0/7,8 | 8<br>4/4       | 8<br>4/4       |
| Количество пекарных секций в печи, шт.                                                         | 3                                  | 2              | 3              | -               | 1              | 1              |
| Площадь пода одной камеры, м <sup>2</sup>                                                      | 0,298                              | 0,864          | 0,864          | 0,34            | 0,3            | 0,29           |
| Количество хлебных форм, шт.                                                                   | 18                                 | 36             | 54             | 6               | 8              | 8              |
| Развес формового хлеба, кг<br>Ржаного<br>Пшеничного: I сорт/ II сорт                           | 1,7<br>1,5/1,5                     | 1,7<br>1,5/1,5 | 1,7<br>1,5/1,5 | 1,8<br>1,0/1,3  | 0,5<br>0,5/0,5 | 0,5<br>0,5/0,5 |
| Напряжение питающей сети, В                                                                    | 127-380                            | 127-380        | 127-380        | 210             | 220            | 220            |
| Количество нагревательных элементов в печи, шт.                                                | 27                                 | 36             | 54             | 12              | 9              | 4              |
| Потребляемая мощность, кВт                                                                     | 9-13                               | 14-18          | 21-27          | 5,4             | 3,5            | 4              |
| Размеры, мм                                                                                    |                                    |                |                |                 |                |                |
| Длина                                                                                          | 1025                               | 1375           | 1375           | 956             | 655            | 1150           |
| Ширина                                                                                         | 765                                | 1213           | 1213           | 834             | 750            | 820            |
| Высота                                                                                         | 1875                               | 1395           | 1940           | 1618            | 1710           | 1630           |
| Масса, кг                                                                                      | 582                                | 820            | 1150           | 203             | 400            | 250            |

Представленное в таблице оборудование представляет широкий спектр возможностей, включая нагрев парогазовой среды пекарной камеры электронагревателями, электроконтактную выпечку, использование ламп инфракрасного излучения и токов высокой частоты (СВЧ). Каждый из этих

способов имеет свои преимущества, и его выбор зависит от требований и особенностей производства хлеба в конкретных условиях.

Рассмотрим особенности обогрева пекарной камеры посредством прохождения электрического тока через нагревательные элементы, размещенные над и под подом. Электрическое сопротивление нагревательных элементов, зависящее от их длины, диаметра и материала, из которого они изготовлены, преобразовывает электрическую энергию в тепловую (по закону Джоуля-Ленца).

Защитная стальная трубка обеспечивает защиту нагревательных элементов от повреждений и не допускает контакта с продуктами пекарной камеры. Теплопроводный наполнитель, зачастую магнезит или керамика, помогает равномерно распределить теплоту по всему пространству хлебопекарной камеры и предотвращает перегрев нагревательных элементов.

Использование нагревательных элементов сопротивления в виде спирали из нихромовой и фехральной проволоки способствует высокой стабильности обогрева и обеспечивает долговечность самого аппарата, создавая оптимальные условия для выпечки хлебобулочных изделий [69].

При обеспечении необходимых условий обогрева в пекарном помещении для электрообогрева сверху и снизу размещают нагревательные элементы с цилиндрическими спиралями из нихромовой проволоки толщиной 0,5-1,0 мм, заделанными в специальную стальную трубку. Диаметр 15-25 мм заполнен магнитами для изоляции отдельных витков. Выходные клеммы подключаются к сети переменного тока напряжением от 127 до 380 В специальными клеммами. Как известно, по закону Джоуля-Ленца электрический ток, текущий по спирали, преобразуется в тепловую энергию, равномерность подачи которой обуславливается динамикой работы нагревателей сопровождаемой электромагнитными эффектами..

Для обогрева пода пекарни необходима удельная мощность 4-8 кВт/м<sup>2</sup>. При этом общая тепловая мощность определяется общей площадью нагревателей, которая определяется площадью печи  $F$  в м<sup>2</sup> и где  $P = pF$  кВт.

Удобство равномерного распределения и регулировки электрической нагрузки между отдельными фазами обеспечивается количеством нагревателей, обычно более шести. Расстояние между электронагревателями постепенно увеличивают, чтобы обеспечить режим нагрева в камере печи с постепенно снижающейся температурой.

При нарушении регулирования температуры в камере оно включается автоматически, что достигается включением или выключением датчиков индивидуальных электронагревателей.

Исходя из имеющихся опытных данных, для производства 1 тонны хлеба требуется 250 кВт электроэнергии. При предположении, что тепловая мощность равна 1 кВт на 860 ккал, это означает, что для этого потребуется около 30 кг обычного топлива. Заметим, что это в 0,3-0,5 раза больше количества топлива, необходимого для обычных канальных, паровых, водяных или тостерных печей с огневым нагревом. Сравнивая стоимость потребляемой электроэнергии с эквивалентной стоимостью топлива (30 кг), можно сделать вывод, что использование электроэнергии в данном случае является более экономически выгодным. Это объясняется тем, что стоимость 250 кВт электроэнергии значительно ниже стоимости топлива, и необходимость в транспортировке, хранении топлива и ремонте оборудования минимизируется [69].

Приведенные сведения говорят о том, что использование электроэнергии в качестве источника теплоснабжения при производстве хлеба является более экономически выгодным решением, особенно при учете дополнительных затрат на использование и обслуживание топливных систем. Ведущие пекари и хлебопекарни предпочитают твердотопливные и газовые печи даже современным электроприборам. Помимо заявленных преимуществ замены одного вида источников тепла другим, преимуществами использования современных тенденций цифровизации производственных процессов (Индустрия 4.0) являются компьютеризация процедур наряду с автоматизацией технологического процесса.

Еще один способ улучшить процесс выпечки, предотвращающий появление канцерогенов, – выпекать хлеб без корочки непосредственно из тестовых заготовок с помощью электрического нагрева.

Особенностью использования такого подхода – электрического способа нагрева тестовых заготовок – является пропускание электрического тока непосредственно через полуфабрикат теста, например при выпечке хлеба с электрическим контактом. Кроме того, такие же эффекты достигаются при использовании ламп инфракрасного ИК-излучения и приготовления пищи в поле тока высокой частоты (СВЧ) [14, 15, 19, 21, 23, 24, 27-30, 40, 42, 50, 52, 57, 58, 65, 75, 86, 87, 92, 132, 134, 155, 156].

При приготовлении пищи с использованием инфракрасных лучей источником передаваемого тепла является электрическая лампа с вольфрамовой спиралью, расположенная перед стеклянной параболической поверхностью, концентрирующей направленные лучи. Лампы этого типа имеют мощность 200-250 Вт и сочетаются со стальной горелкой, интенсивно поглощающей световую ИК-энергию ламп. Основание источников излучения охлаждается воздухом с помощью вентилятора. При нагреве тестовых заготовок в печах с источниками ИК-излучения они выпекаются под воздействием электромагнитных волн с пиковой длиной волны 1,0-30 мкм. Такое излучение может проникнуть глубже в нагретую частицу теста, чем короче длина волны используемого ИК-излучения. Таким образом, тепло, выделяемое ИК-излучателями, воздействует не только на поверхность, но и на верхние слои частиц теста на глубину до нескольких миллиметров. Полученный эффект приводит к очень быстрому нагреву пустот продукта и значительному сокращению времени приготовления при использовании ИК-источников тепловой энергии. Как правило, такой вид выпечки применяется на предприятиях, выпускающих мелко- и тонкослойные изделия [75, 82, 83, 85].

При обычном приготовлении пищи, когда инфракрасное излучение генерируется излучателями, такими как тостер, газовая плита или керамическая плита с подогревом, инфракрасные лучи проникают в обрабатываемое изделие

в течение более длительного периода времени. При использовании конфорок время нагрева значительно сокращается, а быстро образующаяся корочка облегчает проникновение пара, что ускоряет процесс выпечки.

Данный опыт показывает, что при использовании ИК-излучения в стальной печи площадью 1 м<sup>2</sup> с мощностью лампы от 12 до 13 кВт пшеничный и ржаной хлеб выпекаются быстрее, чем обычный хлеб, приготовленный, например, в глиняных печах. Этот инфракрасный способ выпечки позволяет использовать электроэнергию мощностью в среднем 300 кВт для выпечки 1 тонны хлеба. Температура обработки готового продукта при этом остается ниже 110 °С.

Одним из видов выпечки с использованием электротока в качестве источника питания является контактная выпечка. Ф.Г. Шумаев (1936) и Я.Г. Островский (1955) провели хлебопекарные опыты и показали, что тесто выпекалось равномерно по всей массе после расстойки в двух противоположных лоскутах с металлическими стенками, изолированных друг от друга, при пропускании переменного тока нормальной частоты [71,78].

Позже они обнаружили, что электрическая контактная (ЭК) выпечка позволяет производить хлеб без корочки с минимальными затратами энергии. При текущих параметрах время выпечки составляет около 2 минут и зависит от особенностей процесса: указанных размеров тестовых частиц, рецептуры и технологического способа приготовления теста. Удельные затраты энергии на приготовление продукции обычно составляют от 0,077 до 0,115 кВт/кг.

Показатели производства хлебобулочных изделий при ЭК-выпечке являются многообещающими для определенного сегмента хлебопекарной отрасли. В большинстве случаев речь идет о бескорковом хлебе, полуфабрикатах для производства хлебных ломтиков и тостового хлеба.

Процесс и оборудование нагрева исследовались многими авторами. Более глубоко изучены эти вопросы в работах М.С. Краснова, В.Г. Короткова, А.Г. Зинюхиной, Я.Г. Островского, Г.А. Сидоренко, Д.И. Ялалетдиновой [53,78,

102,103,143]. Достаточно важные результаты получены в этой области и такими авторами, как Baker J.C., Bertuzzi T., Mize M.C., Baskar G., Breitbach M., Hickling R., Kaszás L. [146,148, 149, 158, 159].

В выпечке хлеба, особенно при использовании метода инфракрасного нагрева, возникает реакция Майяра, которая связана с образованием меланоидов при высоких температурах корочки. Меланоиды придают хлебу привлекательный внешний вид, но иногда могут негативно влиять на пищевую ценность готового продукта [133, 144].

Некоторые исследователи предполагают, что реакция Майяра может приводить к изменению состава и содержания свободных аминокислот в хлебном изделии. Например, Пономарева А.Н. провела исследование, в результате которого было показано, что количество свободных аминокислот в некоторых случаях даже несколько увеличивалось по сравнению с их исходным содержанием в полуфабрикатах. Установлено, что количество свободных аминокислот, определяемых в хлебной корке, снижено (примерно в 2 раза). Было высказано предположение, что этот эффект связан с их расходом на образование меланоидов.

В одной из своих работ Ауэрман Л.Я. дает сведения исследований Ф. Баума о частичной потере лизина из белков при выпечке [15]. Эта незаменимая и дефицитная аминокислота в хлебных белках в готовом к употреблению хлебе теряет 28-33 % своего содержания при выпечке. В корке это падение более заметно и равно 72-75 % ее стоимости в полуфабрикате до выпечки. Это закономерно снижает биологическую ценность белка готового хлеба при выпечке. Работы В.Л. Кретовича, А.П. Нечаева и И.М. Скурихина посвящены именно этой теме [57,69,139].

Шевелевой Г.И. отмечено частичное снижение биологической ценности хлеба при выпечке с электронагревом [138]. По ее словам, это связано с тепловым разрушением витаминов. В ходе исследований образцы хлеба выпекались при ЭК-, РК-, ИК- и СВЧ-нагревах. Также рассматривались варианты комбинирования (в основном при ИК- и СВЧ-нагревах).

Результаты испытаний показали, что витамины более полно сохраняются при приготовлении в микроволновой печи [17, 58].

Скурихин И.М., анализируя результаты своих исследований, обнаружил, что традиционный способ приготовления связывает до 25% белков, витаминов и аминокислот, одновременно снижая активность ферментов и других соединений, отвечающих за биологическую активность [104,105]. Отмечено, что высокая температура хлебной корочки усиливает процессы накопления в этой части хлеба полициклических ароматических углеводов и продуктов полимеризации жиров. Это также влияет на появление нежелательных полициклических углеводородов, таких как бензопирен. Известно, что он является мощным канцерогеном и веществом, способствующим заболеванию раком. В некоторых случаях в хлебной корке его может накапливаться около 0,5 мкг/кг [26, 100].

### **1.3 Обоснование задач и направлений модернизации аппаратного обеспечения производства хлеба на основе эффектов синергии физических полей**

В особых условиях производства полноценных продуктов питания, в частности, в хлебопекарном производстве часто применяют различные способы и устройства, использующие электромагнитные эффекты, инициирующие протекание необходимых физико-химических превращений. При этом весьма важны условия реализации этих эффектов и связанных с ними режимов подачи электрического тока.

Большое разнообразие проявлений электромагнитного эффекта заставляет остановиться на некоторых базовых представлениях о его возникновении и возможностях управления им.

Возникновение и характеристики электромагнитного эффекта полностью связаны с условиями реализации переходных процессов, в

электрических цепях благодаря содержащимся в них емкостной и индуктивной нагрузки [20].

Характерные особенности таких процессов можно проследить на модельной схеме реализующей работу таких видов нагрузки.

Описание работы любой электрической схемы содержит задание ее характеристик, таких как обобщенные сопротивление, индуктивность и емкость, соответственно  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Пусть они включены в сеть следующим образом (рисунок 1.4).

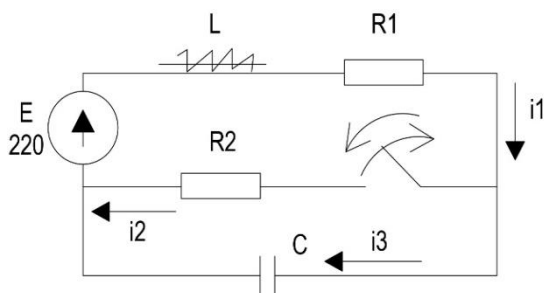


Рисунок 1.4 – Модельная цепь характеризующая протекание изучаемого процесса

В тех случаях, когда характеристики питающих цепь источников постоянны, для ее реакции обычно используют следующие соотношения

$$e(t) = 100 \text{ В}; \quad I(t) = I \text{ А}.$$

Такой расчёт соответствует общепринятым в электротехнике методам.

В некоторых случаях при необходимости использования таких реакций, для сложных режимов нагружения, используют компьютерные методы, где характерные реакции вычисляют с помощью операторного метода [20,70].

При таком подходе находят закономерности проявляемых реакций в зависимости от текущего момента действия нагрузки  $t = (4 - 5) \tau$ .

В том случае, когда искомые решения характеристической зависимости записанной в виде уравнения  $p_1$  и  $p_2$  различны, а сами они являются действительными числами, то

$$\tau = \frac{1}{|p_{\min}|}$$

где  $p_{\min}$  – корень с наименьшим значением  $p_1$  и  $p_2$ .

Когда корни решаемого уравнения комплексные сопряженные числа, то справедлива запись

$$p_{1,2} = \alpha + j\omega$$

$$\tau = \frac{1}{|\alpha|}$$

Для любой из реакций целесообразно вначале находить ток в катушке индуктивности, а также напряжение на конденсаторе или соответствующем устройстве имеющем емкостные характеристики, соответственно  $i_L$  или  $u_C$ . Законы Кирхгофа, как правило следует выражать позже, когда необходимо определить, мгновенные значения цепи уже по завершении коммутационного периода [20].

Классический метод расчёта характеристик переходного процесса состоит в следующем: вначале записывают законы Кирхгофа для цепи после коммутации, потом из анализа характеристик установившегося режима цепи до начала коммутации записывают ток, определенный в катушке ( $i_L(0_-)$ ) а также напряжение на конденсаторе ( $u_C(0_-)$ ). Используя далее соотношения описывающие момент коммутации, находят первичные значения

$$u_C(0) \text{ и } i_L(0).$$

Следующим ответственным этапом является расчет вновь возникшего режим работы цепи и определение значения неизвестной установившегося значения определяемой величины на основе составленного характеристического уравнения в виде его корней. Дальнейшим этапом, при необходимости, является запись решений для свободных составляющих. Важно также определяемую величину записать как принуждённую или свободную. В завершении применяя законы коммутации найди постоянные интегрирования, а если необходимо, то запиши режим коммутации цепи через искомые  $i_L$  или  $u_C$ .

В некоторых случаях для получения характеристического уравнения используют выражение или значение входного операторного сопротивления  $z(p)$ .

С этой целью изображают принципиальную схему цепи исключая имеющиеся источники. Таким образом, например, как следует из примера, подача напряжения блокируется, а подача тока вообще исключается из схемы. Дополнительно разрывают полученную схему в произвольном месте, а между двумя точками разрыва записывают эквивалентное сопротивление, по примеру резистивной цепи. При этом нужно помнить, что вычисление операторного сопротивления проходит при замене индуктивности  $L$  на сопротивление  $pL$ , а вместо ёмкости  $C$  используют сопротивление  $1/C \cdot p$ .

Значения свободных составляющих, например, тока, обозначают принимая во внимание вид корней характеристического уравнения.

В тех случаях, когда  $p_1, p_2, \dots, p_n$  – действительны и различны, их обозначают

$$i_{св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots$$

Если корни комплексно – сопряжённые то их записывают таким образом, где при  $p_{1,2} = \alpha \pm j\omega$

свободная составляющая имеет вид

$$i_{св} = A_1 e^{\alpha t} \sin \omega t + A_2 e^{\alpha t} \cos \omega t = A e^{\alpha t} \sin(\omega t + \varphi)$$

Здесь под  $A_1, A_2, \dots, A_n, A, \varphi$  понимают постоянные интегрирования.

Для операторного метода предлагается иной порядок расчёта, в котором сразу же изображение операторной схемы замещают цепью полученной в уже коммутационном режиме. Соответствующие  $i_L(0_+)$  и  $u_C(0_+)$  берут из ранее проделанного расчёта. На следующем этапе применяют какой либо из известных методов расчёта, например, основанный на законах Кирхгофа или метод контурных токов для чего определяют ( $I(p)$  или  $U(p)$ ) изображением определяемой величины по Лапласу. Завершают расчет применение теоремы разложения и записью соотношения от времени реакции цепи  $i(t)$  или  $u(t)$  [20].

Принимая во внимание предыдущие рассуждения, выполним численный эксперимент с программы для ЭВМ (рисунок 1.5), который

использует указанный метод расчета, варьируя значения сопротивлений и индуктивности:

#### размыкание

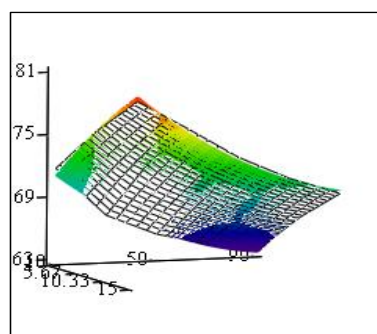
$$\begin{aligned} \text{Given} \quad & L \cdot C \cdot \frac{d^2}{dt^2} U(t) + R1 \cdot C \cdot \frac{d}{dt} U(t) + U(t) = E \\ & U(0) = 0 \quad U(0) = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot E \\ U := & \text{odesolve}(t, t1, 100) \quad t := 0, \frac{t1}{100} .. t1 \quad i(t) := C \cdot \frac{d}{dt} U(t) \end{aligned}$$

#### замыкание

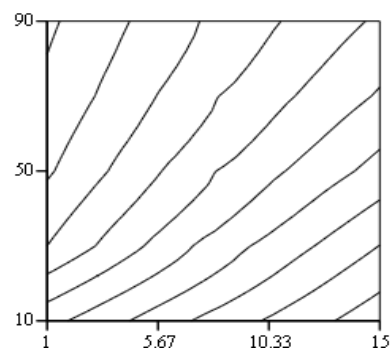
$$\begin{aligned} \text{Given} \quad & L \cdot C \cdot \frac{d^2}{dt^2} U(t) + \left( R1 \cdot C + \frac{L}{R2} \right) \cdot \frac{d}{dt} U(t) + \left( \frac{R1}{R2} + 1 \right) \cdot U(t) = E \\ & U(0) = 0 \quad U(0) = E \\ U := & \text{odesolve}(t, t1, 1000) \quad t := 0, \frac{t1}{100} .. t1 \\ i_1(t) := & C \cdot \frac{d}{dt} U(t) \quad i_1(t) := i_c(t) + \frac{U(t)}{R2} \quad i_2(t) := \frac{U(t)}{R2} \end{aligned}$$

Рисунок 1.5 – Возможный вариант реализации изучаемых процессов

Применяя предлагаемые алгоритмы для вычисления других значений характеристик получают зависимости, графически представленные на рисунках 1.6, 1.7, 1.8, 1.9.



F, (X, Y, Z)

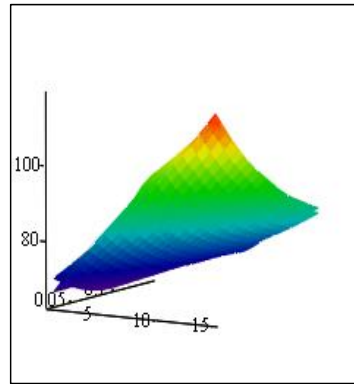


F, (X, Y, Z)

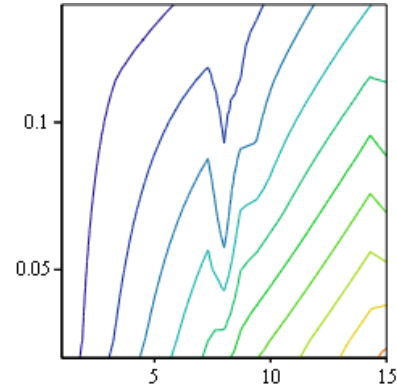
Рисунок 1.6 – Зависимость напряжения от времени (0-15) и балластного сопротивления (10-90)

Зависимости, представленные на указанных рисунках, говорят о монотонном уменьшении напряжения в сети при ее размыкании, однако они

же свидетельствуют о наличии пиковой величины сопротивления, при которой уже в первоначальный промежуток времени напряжение достигает максимального значения [112].



F, (X, Y, Z)



F, (X, Y, Z)

Рисунок 1.7 – Зависимость напряжения от времени (0-15) и балластной индуктивности (0,02-0,14)

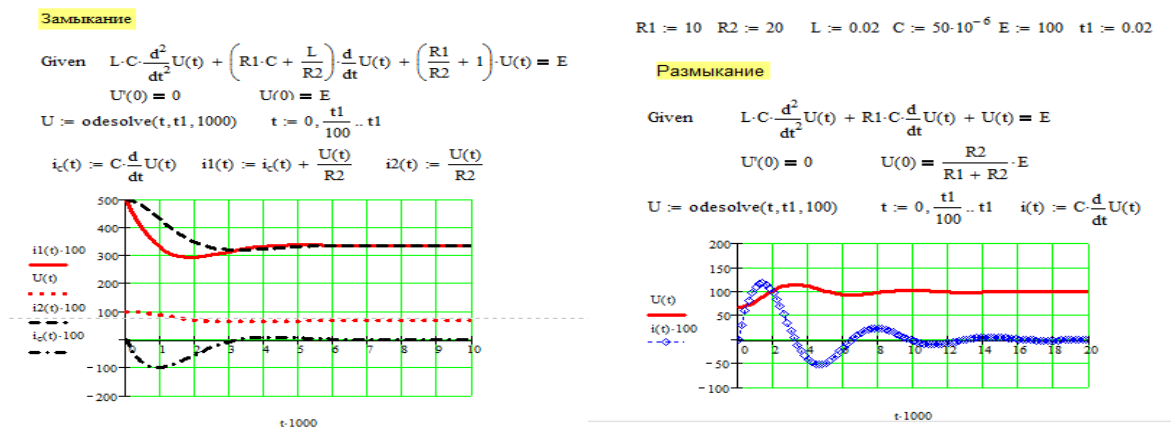


Рисунок 1.8 – Зависимость крутизны импульса для разных параметров цепи

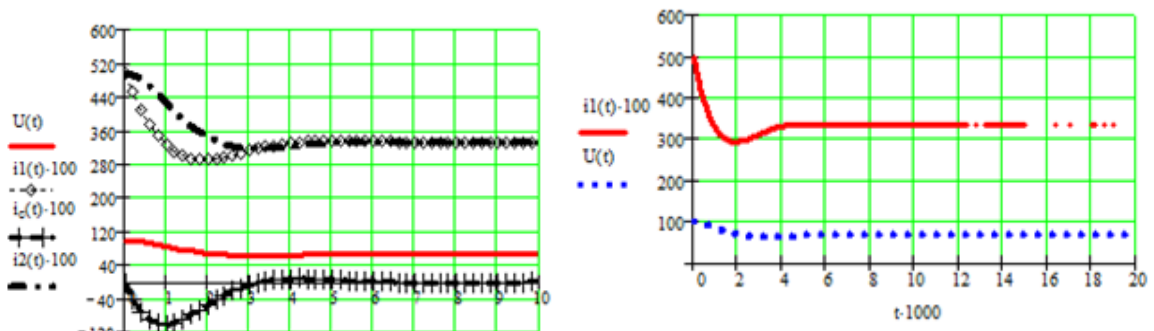


Рисунок 1.9 – Зависимость крутизны импульса для новых параметров цепи

Важное заключение о характере изменения напряжения при разных значениях индуктивности позволяет сделать сравнение найденных расчетных

характеристик цепи в условиях переходного режима, обусловленного процессом замыкания-размыкания. Оно растет в цепи по мере увеличения времени и индуктивности, однако существует критический временной промежуток, после чего происходит резкий его скачек по величине [113].

Такие наблюдения позволяют корректировать параметры сети содержащей балластные индукционную и активную нагрузку (R,L) для управления переходными процессами в ней. Эти возможности обеспечивают создание нужного электрического импульса в технологических емкостях и способствуют более экономичному производству зернового хлеба [113].

Выявленные особенности регулирования пиковых нагрузок в сети дают возможность частичного изменения конструкций оборудования, обеспечивающего более полное использование выявленных эффектов, в том числе, для получения целевого продукта наилучшим образом соответствующего стадиям производства хлеба или хлебобулочных изделий.

#### **1.4 Анализ технических решений модернизации аппаратного обеспечения производства хлеба в особых условиях**

Развитие энергосберегающих технологий, процессов и оборудования в пищевой промышленности в настоящее время направлено на обеспечение баланса эффективности производства и качества конечного продукта. Эти требования будут способствовать дальнейшему устойчивому развитию пищевой промышленности и снижению ее негативного воздействия на окружающую среду [91].

Термическая обработка растительного сырья является наиболее распространенной формой получения готового к употреблению, предварительно обработанного или готового продукта путем теплопередачи, конвекции и излучения.

Многие разработанные нагревательные устройства, используемые сегодня в выпечке хлеба и хлебобулочных изделий, имеют свои сильные и слабые стороны.

Так, в качестве альтернативного способа получения хлеба без корочки используется технология выпечки хлеба в специальных помещениях в атмосфере водяного пара.

После расстойки тележку с тестовыми заготовками загружают в пекарные камеры, дверцы камеры закрывают и подают насыщенный пар под низким избыточным давлением. Температура паровоздушной среды пекарной камеры составляет около 100 °С. За счет этого достигается эффект медленного нагрева структуры полуфабриката (в зависимости от характеристик теста время выпечки может быть увеличено и составлять 11-19 часов) [35].

Классификация теплоносителей представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Классификация теплоносителей [19]

| Теплоноситель                                      | Рекомендуемые режимы |                   | Аппараты                                    |
|----------------------------------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------------------------|
|                                                    | температура          | давление          |                                             |
| Вода                                               | до 90                | Атмосферное       | Мармиты, термостаты                         |
| Водяной пар                                        | до 200               | Выше атмосферного | Автоклавы, котлы, пароварочные шкафы        |
| Органические жидкости: глицерин                    | до 180               | Атмосферное       | Сковороды, шкафы, мармиты, котлы, автоклавы |
| этиленгликоль                                      | до 200               |                   |                                             |
| Диарилметаны: дикумилметан ДКМ                     | до 300               | Атмосферное       | Линии варочных и жарочных аппаратов         |
| Дитолилметан ДТМ                                   | до 300               | Атмосферное       |                                             |
| Кремнийорганические жидкости: ПФМС-4, ПФМС-5, ФМ-6 |                      |                   | Сковороды, шкафы, мармиты, котлы, автоклавы |
| Топочные газы                                      | до 1000              | Атмосферное       |                                             |
| Влажный воздух                                     | до 300               | Атмосферное       | Пекарные шкафы                              |

Технологическое оборудование для пищевой промышленности представлено различными видами отечественного и зарубежного производства. Это зависит от местоположения, типа продукции, электропитания оборудования и т. д. Как свидетельствуют различные условия производства, предприятия не только используют серийное оборудование на машиностроительных заводах, но и восстанавливают

существующее оборудование совместно с проектными организациями или отдельными специалистами. Направления совершенствования также очень широки: расширение ассортимента, улучшение качества продукции, энергосбережение и т. д. Вновь разрабатываемое и устанавливаемое производственно-технологическое оборудование должно отвечать следующим критериям: повышение качества выпускаемой продукции, простота обслуживания, интеграция, уровень автоматизации и т. д. При этом важную роль играют технико-экономические показатели ее работы: удельные энергозатраты на выпечку хлеба, стоимость печи, металлоемкость и т. д.

Пищевая промышленность сегодня использует большое количество технологического оборудования российского и иностранного производства. Это объясняется разнообразием местных условий, широким ассортиментом выпускаемой продукции, разным энергообеспечением оборудования (электричество, разные виды топлива) и рядом других факторов. Помимо оборудования, выпускаемого серийно на специализированных машиностроительных заводах, в промышленности широко распространено оборудование, разработанное конкретными проектными организациями или отдельными специалистами. Модернизация оборудования может служить различным целям. Для повышения производительности изменяют вид выпускаемой продукции, улучшают качество и т. д. Можно сосредоточить внимание, наряду с критериями оценки качества оборудования, на качестве выпускаемой продукции, простоте обслуживания техники, уровне автоматизации и некоторых других, важную роль также играет техническое оснащение. Экономические показатели эффективности: удельные энергозатраты на выпечку, стоимость печи, металлоемкость и т. д. Все это необходимо учитывать при проектировании новых видов и реконструкции существующих единиц техники, используемой для выпечки хлеба. Сегодня хлебопекарное оборудование представлено многими типами печей [57].

Тепловое излучение является одной из форм передачи энергии. Отличительная особенность теплового излучения уникальна для каждого организма.

Любое тело может излучать тепло в окружающую среду, даже если оно имеет ту же температуру, что и окружающая среда. Поэтому тепловое излучение обязательно сопровождается поглощением воздействия извне в организм.

В условиях теплового равновесия оба эффекта компенсируют друг друга. Если тела, излучающие тепловую энергию из одного в другое, имеют разную температуру, то энергия передается от тел с большей температурой к телам с более низкой температурой, т. е. тепло производится излучением. ИК-излучение в тепловом оборудовании в настоящее время используется как самостоятельный метод нагрева изделий, а также как основной метод создания различных комбинированных способов термической обработки [115].

Физический смысл механизма ИК-нагрева заключается в следующем. Большинство пищевых продуктов содержат в своей пористой структуре значительное количество свободной воды, интенсивно поглощающей ИК-излучение в определенном диапазоне длин волн (длины волн 0,75 – 2,5 мкм). Поглощение достигает 100 % при длине волны 1,4 мкм. При этом влага в пористой структуре пищевых продуктов распределяется между объемами неравномерно, поэтому ИК-излучение может проникать на значительную глубину, что при правильном выборе определяет толщину слоя обрабатываемого продукта, который имеет объемный характер нагрева. При ИК-нагреве максимальная температура продукта обычно достигается на определенной глубине в зависимости от структуры и влажности продукта, а также длины волны излучения. При термообработке изменяются свойства поверхностных слоев изделия, что приводит к усилению поглощения ИК-энергии и увеличению нагрева в отличие от обычных (поверхностных) условий нагрева. Подобный эффект вызывает образование в обрабатываемом продукте водяного пара, который интенсивно поглощает ИК-излучение с длинами волн более 15 микрон [43, 44, 46, 47, 60, 71-74, 111].

Таким образом, благоприятным фактором для ИК-обработки пищевых продуктов является наличие длин волн в спектре используемого генератора излучения и свободной влаги в продукте, т.е. высокая влажность исходного продукта [56,75,116].

При ИК-нагреве поток энергии излучения на изделия подразделяется на три части – отраженный ( $\mathcal{E}_0$ ), поглощенный ( $\mathcal{E}_n$ ) и прошедший ( $\mathcal{E}_{\text{пр}}$ )

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_n + \mathcal{E}_{\text{пр}}. \quad (1.1)$$

Соотношение между этими компонентами потока может быть самым различным и зависит от структуры, влажности, температуры, толщины слоя продукта и длины волны ИК-луча (таблица 1.4) [19].

Проникающее в продукт излучение ослабляется в его толще согласно закону Бугера, который можно представить в виде:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}}(x) = \mathcal{E}_{\text{пр}}(0) \exp(-\alpha \cdot x), \quad (1.2)$$

где  $x$  – координата, отсчитываемая вглубь продукта (на его поверхности  $x = 0$ );

$\alpha$  – коэффициент поглощения ИК-излучения, зависящий от свойств обрабатываемого продукта и длины волны  $\lambda$  или частоты  $\nu$  излучения, связанных соотношением:

$$\lambda = s / \nu, \quad (1.3)$$

где  $s = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме.

Согласно закону Бугера с увеличением толщины слоя продукта его пропускная способность ( $\mathcal{E}_{\text{пр}}/\mathcal{E}$ ) для ИК-лучей становится меньше.

Проницаемость продуктов быстро снижается с увеличением длины волны ИК-излучения. Эта закономерность просматривается по данным табл. 1.4, в которой под  $\lambda_{\text{max}}$  подразумевается длина волны, соответствующая максимуму в спектре ИК-излучения. Согласно известному закону смещения Вина величина  $\lambda_{\text{max}}$  связана с температурой излучателя соотношением ( $\lambda$  – в мкм,  $T$  – в К):

$$\lambda_{\text{max}} = 2898/T. \quad (1.4)$$

Таблица 1.4 – Проницаемость пищевых продуктов для ИК-излучения [19]

| Продукты и изделия             | Влажность, % | Толщина слоя, мм | $\lambda_{\max}$ , мкм |         |         |      |      |
|--------------------------------|--------------|------------------|------------------------|---------|---------|------|------|
|                                |              |                  | 1,04                   | 2,3-2,5 | 2,7-2,9 | 3,8  | 4,5  |
| Мясо свиное                    | 70-72        | 0,5              | 42,0                   | 18,1    | 14,4    | 7,6  | 5,1  |
|                                |              | 2,0              | 10,6                   | 2,6     | 2,0     | 1,5  | 0,39 |
|                                |              | 4,0              | 5,2                    | 1,1     | 0,75    | 0,36 | 0,11 |
| Мясо говяжье                   | 71-73        | 0,5              | 34,0                   | 15,2    | 12,4    | 10,1 | 4,5  |
|                                |              | 2,0              | 8,8                    | 2,2     | 1,5     | 1,1  | 0,23 |
|                                |              | 4,0              | 4,4                    | 0,8     | 0,55    | 0,37 | 0,07 |
| Белое мясо кур                 | 69           | 0,5              | 54,6                   | 47,2    | 13,4    | 11,6 | 9,0  |
|                                |              | 2,0              | 21,3                   | 3,1     | 2,8     | 2,0  | 1,8  |
|                                |              | 4,0              | 10,0                   | 0,5     | 0,5     | 0,2  | -    |
| Красное мясо кур               | 68-69        | 0,5              | 49,0                   | 15,0    | 10,3    | 8,2  | 6,7  |
|                                |              | 2,0              | 18,0                   | 2,6     | 1,9     | 1,3  | 10,0 |
|                                |              | 4,0              | 7,8                    | 0,8     | 0,3     | 0,1  | 0    |
| Бифштекс натуральный           | 68,8         | 0,5              | 38,9                   | 20,6    | 11,3    | 8,5  | 6,6  |
|                                |              | 2,0              | 1,6                    | 5,8     | 1,41    | 0,81 | 0,35 |
| Бифштекс рубленый              | 68           | 0,5              | 31,4                   | 21,5    | 13,2    | 8,7  | 6,6  |
|                                |              | 2,0              | 7,55                   | 4,4     | 1,33    | 0,8  | 0,12 |
| Котлета рубленая               | 73,2         | 0,5              | 26,7                   | 16,6    | 10,5    | 8,7  | 7,1  |
|                                |              | 2,0              | 6,72                   | 3,7     | 0,95    | 0,6  | 0,32 |
| Треска (мышечная ткань)        | 80,8         | 0,5              | 55,8                   | 17,8    | 15,2    | 12,8 | 13,9 |
|                                |              | 2,0              | 32,5                   | 4,5     | 3,6     | 2,0  | 2,4  |
| Морской окунь (мышечная ткань) | 74,9         | 0,5              | 53,4                   | 14,7    | 13,1    | 12,5 | 11,7 |
|                                |              | 2,0              | 29,0                   | 3,5     | 2,9     | 1,4  | 0,6  |
| Палтус (мышечная ткань)        | 84           | 0,5              | 58,4                   | 18,7    | 16,9    | 15,1 | 14,7 |
|                                |              | 2,0              | 30,1                   | 3,3     | 5,7     | 2,8  | 2,6  |
| Молоко (жирность 3,2 %)        |              | 0,1              | 60,1                   | 25,5    | -       | -    | -    |
|                                |              | 0,5              | 30,0                   | 10,3    | -       | -    | -    |
|                                |              | 0,9              | 21,5                   | 5,9     | -       | -    | -    |

Для создания благоприятной для ИК-обработки величины  $\lambda_{\max} = 1-1,5$  мкм температура поверхности ИК-излучателя должна составлять 2000-3000 К. В частности, кварцевая лампа НИК-1000 имеет температуру около 2060 К и, соответственно,  $\lambda_{\max} = 1,4$  мкм. Существуют и другие источники ИК-энергии,

пригодные для реализации ИК-нагрева [19] в оборудовании, предназначенном для приготовления полноценных продуктов питания.

При расчетах энергетического баланса ИК-нагрева используют обобщенный закон Стефана-Больцмана.

Он определяет тепловую мощность, передаваемую излучением от тела с температурой  $T_1$  (излучателя) к телу с температурой  $T_2$  (продукту):

$$\dot{Q} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \cdot H, \quad (1.5)$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана – Больцмана;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты (для пищевых продуктов  $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,5 - 0,9$ );

$H$  – взаимная излучающая поверхность рассматриваемых двух тел:

$$H = \varphi_{1-2}; F_1 = \varphi_{2-1} \cdot F_2, \quad (1.6)$$

где  $F_1, F_2$  – площади поверхностей первого и второго тел соответственно;

$\varphi_{1-2}, \varphi_{2-1}$  – коэффициенты облученности одного тела другим.

Положительным свойством ИК-нагрева является получение однородного по цвету и толщине коричневого покрытия готового изделия. Однако этот метод имеет некоторые недостатки [19]:

не все продукты могут подвергаться ИК-нагреву;

при высоких плотностях потока ИК-излучения изделие может «сгореть».

В качестве электрических генераторов коротковолнового инфракрасного излучения применяют два типа устройств: инфракрасные стеклянные лампы накаливания и трубчатые инфракрасные галогенные кварцевые излучатели. В последние годы трубки из кварцевого стекла стали более популярными, чем стеклянные инфракрасные лампы для обогрева печей, известные как инфракрасные излучатели. Кварцевые нагреватели более совершенны, чем стеклянные лампы, и имеют перед ними ряд важных преимуществ. Так, использованное в них кварцевое стекло устойчиво к высоким температурам – температура размягчения превышает  $170^\circ\text{C}$ , а также оно имеет хороший коэффициент пропускания в широком диапазоне длин волн - от ультрафиолетовых до инфракрасных лучей с длиной волны 4 микрона.

### **Выводы по главе**

1. Проанализированы существующие проблемы производства полноценных продуктов питания, состоящие в отсутствии образцов технологического оборудования мобильных при обеспечении быстрой системной перекомпоновки линий для производства конкретного вида хлеба, обусловленных требованиями особых условий.

2. Проведена оценка современных рецептур, технологии и оборудования для производства обогащенного хлеба в особых условиях, выявившая отсутствие методик расчета степени его «полноценности» для конкретных особых условий обособленного размещения производства.

3. Выявлены возможности совершенствования процессов и аппаратного оборудования использующего электромагнитный эффект свидетельствующие о возможности обеспечения режимов таких переходных процессов, которые позволяют существенно сократить время срабатывания микровыключателей изменением крутизны импульса (рисунки 1.8 и 1.9).

4. Оценено состояние модернизации аппаратного оборудования для соответствия требованиям по производству обогащенного хлеба говорящее о возможности использования эффектов синергии физических полей.

## **ГЛАВА 2 АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОБОГАЩЕННОГО ХЛЕБА В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ**

### **2.1 Обоснование физических принципов и аналитических моделей корректировки рецептур производства хлеба для обеспечения населения нутриентами в особых условиях**

Проблемы корректировки рецептур для полноценного питания путем введения пищевых волокон пектина связаны с недостаточно аргументированным обоснованием выбора параметров для проведения его гидролиза [125,126].

Рассмотрим возможности выбора используемых при гидролизе кислот в проточном реакторе с магнитострикционными элементами, описанном в [84].

Степень этерификации (Е) в процентах вычисляли по формуле 2.1.

$$E = \frac{\psi_2}{\psi_1 + \psi_2} \cdot 100, \quad (2.1)$$

где  $\psi_1$  – объем раствора гидроксида натрия 0,1 моль/дм<sup>3</sup>, используемого на первое титрование, см<sup>3</sup>;  $\psi_2$  – объем раствора гидроксида натрия 0,1 моль/дм<sup>3</sup>, используемого на второе титрование, см<sup>3</sup>.

В качестве результата принимали среднеарифметическое значение результатов трех параллельных определений, допускаемое абсолютное расхождение не превышало 1 % ( $P = 0,95$ ) [124].

Определение степени этерификации пектиновых веществ осуществляли методом титрования для определения свободных и омыленных карбоксильных групп полигалактуроновой кислоты в образцах пектиновых препаратов, очищенных от растворимых балластных примесей и катионных соединений [106].

Множество факторов, таких как концентрация, степень этерификации, длина молекулярной цепи, присутствие электролитов, температура, оказывают влияние на вязкость водного раствора пектина. При прочих равных условиях вязкость возрастает с увеличением молекулярной массы пектина. Измерение вязкости пектиновых растворов использовали для характеристики молекулярной массы пектинового вещества [124].

Вязкость растворов пектина рассчитывали по формулам 2.2, 2.3 и 2.4.

Относительная вязкость

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{\tau_{\text{вз}}}{\tau_1}, \quad (2.2)$$

где  $\tau_{\text{вз}}$  – время истечения через вискозиметр исследуемого раствора,  $\tau_1$  – время истечения растворителя.

Удельная вязкость

$$\eta_{\text{уд}} = \eta_{\text{от}} - 1. \quad (2.3)$$

Приведенная вязкость

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{\eta_{\text{уд}}}{C_{\text{пек}}}, \quad (2.4)$$

где  $C_{\text{пек}}$  – концентрация пектина в 100 мл раствора, г.

Величину средневязкостной молекулярной массы рассчитывали путем логарифмирования уравнения 2.5:

$$[\eta] = k \cdot M^\gamma, \quad (2.5)$$

где  $k$  и  $\gamma$  – постоянные:  $k = 1,1 \cdot 10^{-5}$ ,  $\gamma = 1,22$ .

Поскольку значения постоянных  $k$  и  $\alpha$  зависят от структуры пектиновой молекулы и прежде всего от количества  $L$ -рамнозильных остатков, вычисляли:

$$\lg M = \frac{\lg[\eta] - \lg 1,1 \cdot 10^{-5}}{1,22}. \quad (2.6)$$

Массовую долю влаги определяли путем высушивания образца.

При проведении эксперимента использовалась кислотно-спиртовая технология получения пектина из растительного сырья [124].

Перед извлечением пектина клубни топинамбура (влажность топинамбура 88 %) в количестве 100 г измельчались на шнековом оборудовании, размер частиц 1-2 мм, затем промывались холодной водой, поскольку пектин не растворяется в холодной воде (температура  $H_2O$  не выше 10-15 °C).

Гидролиз-экстрагирование пектина проводилось из измельчённого топинамбура в количестве 100 г раствором кислоты ( $pH=2,0-2,3$ ) при гидромодуле процесса 1:44. Экстрагирование длилось 40 минут при температуре 100 °C. По истечении времени гидролиза-экстрагирования пектиновый экстракт проходил фильтрацию через фильтровальную ткань, затем концентрировался в вакуумном испарителе при непрерывном перемешивании,  $t = 100^\circ C$ ,  $P = 10$  мбар. Пектин осаждался из раствора 96%-м этиловым спиртом в течение одного часа. Соотношение объемного количества концентрата и спирта составляет 1:3. Осажденный пектин отделялся от раствора путем фильтрования. Пектин, оседающий на фильтровальной ткани, промывался 80 %-м этиловым спиртом. Сушка пектина проходила при температуре 50-60 °C на сушильном оборудовании, на силиконовой подложке, после чего он измельчался [124, 132].

Результаты, полученные при анализе проведенных исследований при использовании в качестве экстрагента минеральных кислот, представлены в таблице 2.1, а аналогичные сведения, полученные для органических кислот, сведены в таблицу 2.2 [124].

Анализируя полученные для минеральных кислот результаты, можно отметить, что наименьшая степень этерификации выявлена у азотной кислоты (31 %), а наибольшая у соляной (56 %). При этом максимальная молекулярная масса (13469) для такого способа экстрагирования отмечена при использовании в качестве экстрагента соляной кислоты, а минимальная (6572) при использовании фосфорной кислоты. Влажность продукта оставалась достаточно высокой (18-24 %) для всех экспериментов.

Таблица 2.1 – Результаты экспериментальных исследований использования минеральных кислот в качестве экстрагента

| Параметры                        | Образец 1 |                  |                                | Образец 2 |                  |                                | Образец 3 |                  |                                |
|----------------------------------|-----------|------------------|--------------------------------|-----------|------------------|--------------------------------|-----------|------------------|--------------------------------|
|                                  | HCl       | HNO <sub>3</sub> | H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | HCl       | HNO <sub>3</sub> | H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | HCl       | HNO <sub>3</sub> | H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> |
| Масса топинамбура, г             | 50        | 100              | 100                            | 50        | 100              | 100                            | 50        | 100              | 100                            |
| Дистил. вода, мл                 | 264       | 528              | 528                            | 264       | 528              | 528                            | 264       | 528              | 528                            |
| V <sub>HCl</sub> (1 М), мл       | 25        | 30               | 50                             | 25        | 30               | 50                             | 25        | 30               | 50                             |
| pH                               | 2,2       | 2,2              | 2,2                            | 2,2       | 2,2              | 2,2                            | 2,2       | 2,2              | 2,2                            |
| Гидролиз                         |           |                  |                                |           |                  |                                |           |                  |                                |
| Время, мин                       | 40        | 40               | 40                             | 40        | 40               | 40                             | 40        | 40               | 40                             |
| Температура, °С                  | 100       | 100              | 100                            | 100       | 100              | 100                            | 100       | 100              | 100                            |
| Фильтрация                       |           |                  |                                |           |                  |                                |           |                  |                                |
| V <sub>(после фильтр)</sub> , мл | 306       | 610              | 614                            | 308       | 600              | 640                            | 302       | 614              | 632                            |
| Концентрация                     |           |                  |                                |           |                  |                                |           |                  |                                |
| Температура, °С                  | 100       | 100              | 100                            | 100       | 100              | 100                            | 100       | 100              | 100                            |
| Время, мин                       | 66        | 72               | 85                             | 59        | 72               | 90                             | 52        | 72               | 66                             |
| V <sub>воды</sub> , мл           | 224       | 558              | 536                            | 258       | 538              | 538                            | 258       | 570              | 586                            |
| V <sub>конц.</sub> , мл          | 82        | 52               | 78                             | 50        | 62               | 102                            | 44        | 44               | 46                             |
| V <sub>спирта</sub> (1:3), мл    | 216       | 156              | 234                            | 150       | 186              | 306                            | 132       | 132              | 138                            |
| Масса пектина, г                 | 0,27      | 0,43             | 1,01                           | 0,41      | 0,3              | 1,11                           | 0,45      | 0,41             | 1,27                           |

Авторами работы [142] получены аналогичные результаты, свидетельствующие о высокой детоксицирующей активности пектина топинамбура. По их данным пектин обладал низкой молярной массой (5248 г/моль), высокой уронидной составляющей (85,3 %), низкой степенью этерификации (7,2 %) и высокой сорбционной способностью (57,45 %). Некоторое различие результатов объясняется тем, что авторами для эксперимента брался порошок топинамбура [124].

Анализируя полученные для органических кислот результаты, можно отметить, что наименьшая степень этерификации выявлена для лимонной кислоты C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> 10,4 %, причем в этом же случае отмечена и минимальная молекулярная масса – 2582. Использование щавелевой кислоты C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub> выявило у образцов степень этерификации – 46 %, а молекулярную массу – 9462. Влажность пектина составляла в каждом из испытаний – 16 %.

Некоторые различия с данными работ [150] можно объяснить различной влажностью испытываемых образцов [124].

Таблица 2.2 – Результаты использования органических кислот в качестве экстрагента

| Параметры                        | Образец 1                                    |                                              | Образец 2                                    |                                              | Образец 3                                    |                                              |
|----------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                  | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> |
| Масса топинамбура, г             | 100                                          | 100                                          | 100                                          | 100                                          | 100                                          | 100                                          |
| Дистиллированная вода, мл        | 528                                          | 528                                          | 528                                          | 528                                          | 528                                          | 528                                          |
| V <sub>HCl</sub> (1 М), мл       | 3                                            | 35                                           | 3                                            | 35                                           | 3                                            | 35                                           |
| pH                               | 2,3                                          | 2,2                                          | 2,3                                          | 2,2                                          | 2,3                                          | 2,2                                          |
| Гидролиз                         |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |
| Время, мин                       | 40                                           | 40                                           | 40                                           | 40                                           | 40                                           | 40                                           |
| Температура, °C                  | 100                                          | 100                                          | 100                                          | 100                                          | 100                                          | 100                                          |
| Фильтрация                       |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |
| V <sub>(после фильтр)</sub> , мл | 582                                          | 578                                          | 564                                          | 596                                          | 596                                          | 614                                          |
| Концентрация                     |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |
| Температура, °C                  | 100                                          | 100                                          | 100                                          | 100                                          | 100                                          | 100                                          |
| Время, мин                       | 73                                           | 75                                           | 67                                           | 65                                           | 73                                           | 66                                           |
| V <sub>воды</sub> , мл           | 522                                          | 506                                          | 522                                          | 540                                          | 540                                          | 544                                          |
| V <sub>конц.</sub> , мл          | 60                                           | 72                                           | 42                                           | 56                                           | 56                                           | 70                                           |
| V <sub>спирта</sub> (1:3), мл    | 180                                          | 360                                          | 126                                          | 168                                          | 168                                          | 210                                          |
| Масса пектина, г                 | 1,1                                          | 0,59                                         | 0,88                                         | 1,05                                         | 0,85                                         | 0,8                                          |

В таблице 2.3 представлены результаты по выходу пектина.

Таблица 2.3 – Выход пектина

| Образцы                                              | Кислота |         |           |           |          |
|------------------------------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|----------|
|                                                      | Соляная | Азотная | Фосфорная | Щавелевая | Лимонная |
| Масса пектина (сухого вещества) на 100 г топинамбура |         |         |           |           |          |
| 1                                                    | 6,4     | 5,4     | 6,4       | 6,4       | 5,2      |
| 2                                                    | 6,6     | 5,7     | 6,6       | 6,5       | 5,5      |
| 3                                                    | 6,5     | 5,1     | 6,2       | 6,6       | 5,6      |
| Выход, %                                             | 6,5     | 5,5     | 6,4       | 6,5       | 5,4      |

Анализ представленных в таблицах 2.1, 2.2 и 2.3 результатов позволяет сделать вывод о том, что природа экстрагента существенно влияет на процесс и конечный выход продукта.

Из полученных экспериментальных данных видно, что максимальный выход пектина топинамбура достигается при наличии в процессе экстракции щавелевой и соляной кислот (6,5 %). Использование соляной кислоты имеет ряд недостатков по сравнению с щавелевой кислотой в реальных промышленных условиях, в частности коррозию металлического оборудования. Кроме того, она выделяет вредные газы, которые выбрасываются в окружающую среду и требуют сложной очистки пектина для удаления токсичных продуктов [124].

Эти данные позволяют предположить замену неорганических кислот (в том числе соляной кислоты) при экстрагировании пектина из топинамбура щавелевой кислотой.

В некоторых случаях использования пектина, например, при производстве мучных кондитерских изделий, важную роль играет цвет пектиновых экстрактов.

Для проведения эксперимента были подготовлены четыре одинаковых образца для определения способов окраски готового продукта. К 38 г измельченного корня топинамбура добавляли 200 мл дистиллированной воды и 1,5 г щавелевой кислоты и выдерживали при 105 °С в течение 60 минут. В результате экстракт приобретал определенный цвет.

Первый образец был контрольным (неотбеленным с помощью щавелевой кислоты) и взят для сравнения окраски с другими.

Второй образец несколько раз фильтровали через угольную колонку после гидролиза и фильтрации [124].

В третьем образце экстракцию проводили с добавкой 10 г активированного угля. Перед сравнением древесный уголь из образцов отделяли центрифугированием.

Четвертый образец перед гидролизом подвергали термической обработке в горячей воде в течение 5 минут. На рисунке 2.1 представлены образцы после фильтрования.

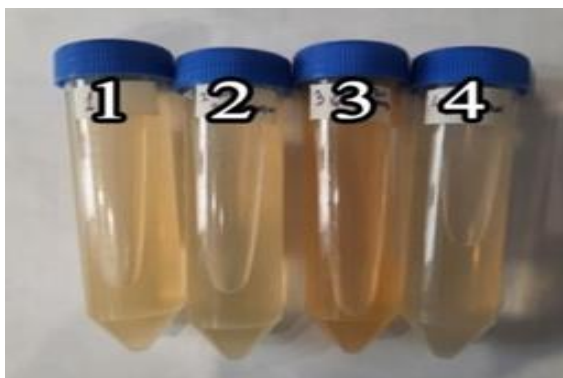


Рисунок 2.1 – Образцы пектиновых экстрактов

После визуального осмотра пектиновые экстракты фильтровали через тканевый фильтр и концентрировали в вакуумном испарителе с уменьшением объема не менее, чем в 3 раза. Для осаждения пектина из раствора в течение одного часа использовался 96 %-й этанол в соотношении объема раствора к спирту 1:3. Коагулят отделяли от раствора фильтрованием, а затем несколько раз промывали 80 %-м этиловым спиртом.

Полученный пектин высушивали при температуре 50 °С до постоянного веса. На рисунке 2.2 показаны образцы пектина, полученные после сушки [125].



Рисунок 2.2 – Пектин, полученный после сушки [124]

Как следует из рисунка 2.2, в образцах 2 и 3 разделение активированного угля и пектинового экстракта затруднено, поскольку частицы угля проходят через фильтровальную ткань в фильтрат. Раствор сохраняет интенсивную окраску, что влияет на цвет конечного продукта и на возможности его использования, например, в кулинарных целях [125].

Образец 4, в котором перед измельчением клубни дополнительно подвергались термической обработке, имел самую светлую окраску.

Исследования показали возможность замены соляной кислоты на щавелевую, что обеспечивает необходимое качество конечного продукта и более длительный срок эксплуатации технических устройств [125].

Выбранные режимы предотвращают негативные изменения пектина под действием щавелевой кислоты. Известно, что под действием кислот молекулы растворимых пектиновых веществ могут претерпевать одновременно два важных изменения: омыление этерифицированных карбоксильных групп и разрушение молекулы путем разрыва гликозидной связи между остатками *D*-галактуроновой кислоты. Даже при комнатной температуре в осажденной полигалактуроновой кислоте может происходить омыление пектиновых веществ [125].

Наряду с метоксигруппами омыляются и ацетильные группы молекулы пектина. С повышением температуры усиливается кислотное омыление, что может привести к распаду макромолекул по их основным значениям. Хотя омыление может происходить при температуре около 50 °С и сопровождаться значительной деградацией макромолекулы, длительный кислотный гидролиз приводит к полной деградации молекулы пектина до галактуроновой кислоты.

Исследования показывают, что мягкая термическая обработка, например, за счет предварительной промывки загружаемого измельченного топинамбура в реактор горячей водой, расширяет возможности использования продукта.

Исследования состояния производства полноценных продуктов питания в особых условиях показывают, что их ассортимент в России улучшается с каждым годом. Однако, согласно этим исследованиям более 40 % потребителей такого питания стремятся использовать в своем рационе продукты, с превышающими количествами пищевых добавок рекомендованными нормирующими документами [120]. С 2019 года

Роспотребнадзор по поручению Президента Российской Федерации приступил к решению большой и важной социальной проблемы массовой организации здорового питания в России в рамках федерального проекта «Укрепление здоровья населения» и национального проекта «Демография». Эти программы открыли новые перспективы на рынке полноценного питания в виде новых ассортиментов, рецептур продуктов и использования новых технологий, направленных на профилактику и поддержание здоровья.

Уже сейчас предложение продуктов полноценных продуктов питания достаточно широко и потребителю предоставляется возможность выбора питания согласно нормирующим документам. Всемирной организацией здравоохранения разработаны рекомендации по правильному, здоровому питанию для многих групп населения. Общеизвестно, что для нормального функционирования организма необходим строгий баланс соотношения белков, жиров и углеводов (БЖУ).

Вместе с тем список полезных для употребления продуктов сужается при организации питания граждан, не употребляющих в пищу мясо, которые должны восполнять баланс пищевых жиров за счет употребления определенного количества растительных продуктов [120].

Для защиты здоровья большинства людей эксперты ВОЗ рекомендуют ежедневный сбалансированный прием БЖУ. Нормы потребления БЖУ представлены в таблице 2.4. Определим суточный диапазон потребления продуктов питания (из трех видов хлебобулочных изделий, представленных в меню), который следует употреблять для восполнения в определенной части общего суточного потребления продуктов питания согласно рекомендуемым значениям ВОЗ. Используем с этой целью подходы линейного программирования для определения ежедневных количеств продуктов, которые поддерживают нормальное здоровье [120].

Для этой цели примем за недельную норму потребления различных хлебобулочных изделий, например, следующий диапазон питательных

веществ: жиры – 30-60 граммов; белки – 45-55 граммов; углеводы – 70-100 граммов.

Таблица 2.4 – Нормы потребления БЖУ

| Группа населения<br>(с высокой физической активностью) | Возрастные группы | Белок, г |                                | Жиры, г | Углеводы, г |
|--------------------------------------------------------|-------------------|----------|--------------------------------|---------|-------------|
|                                                        |                   | Всего    | В т.ч. животного происхождения |         |             |
| Мужчины                                                | 18-29             | 102      | 56                             | 136     | 518         |
|                                                        | 30-39             | 99       | 54                             | 132     | 504         |
|                                                        | 40-59             | 95       | 52                             | 126     | 483         |
| Женщины                                                | 18-29             | 87       | 48                             | 116     | 441         |
|                                                        | 30-39             | 84       | 46                             | 112     | 427         |
|                                                        | 40-59             | 80       | 44                             | 106     | 406         |

Для проведения расчетов предоставлены технологические карты трех хлебобулочных изделий, которые были разработаны с использованием добавок пектина на новом оборудовании: а – хлеб штучный; б – батон; в – сдобная булочка (рисунок 2.3).



а



б



в

Рисунок 2.3 – Изделия из расчетного меню:  
а – хлеб штучный; б – батон; в – сдобная булочка

В таблице 2.5 представлено содержание БЖУ в этих изделиях.

Цифровизация принимаемого решения по количеству приготавливаемых изделий была выполнена в виде расчета на ЭВМ по программе [113,116].

Результаты расчета свидетельствуют о том, что для обеспечения недельного рекомендуемого баланса БЖУ понадобится 1 хлеб штучный, около 3 сдобных булочек и примерно 1 батон. Уточнение этих результатов возможно при учете особенностей контингента питающихся в соответствии с полом, и возрастом.

Таблица 2.5 – Состав питательных веществ в выбранных изделиях

| Элементы       | изделия |      |      |
|----------------|---------|------|------|
|                | а       | б    | в    |
| Белки          | 10,8    | 7,1  | 10,9 |
| Жиры           | 8,8     | 8,3  | 15,6 |
| Углеводы       | 5,4     | 17,1 | 20,3 |
| Вес изделия, г | 295     | 250  | 150  |

Целевая функция в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$f(x_1, x_2, x_3) = 250x_1 + 150x_2 + 295x_3$$

Коэффициенты перед  $x_i$  – это вес изделия, а  $x_i$  – количество изделий.

Необходимо учесть ограничения по количеству БЖУ в неделю.

Ограничение по белкам:

$$7,1x_1 + 10,9x_2 + 10,8x_3 \geq 45,$$

$$7,1x_1 + 10,9x_2 + 10,8x_3 \leq 55.$$

Ограничение по жирам:

$$8,3x_1 + 15,6x_2 + 8,8x_3 \geq 30,$$

$$8,3x_1 + 15,6x_2 + 8,8x_3 \leq 60.$$

Ограничения по углеводам:

$$17,1x_1 + 20,3x_2 + 5,4x_3 \geq 70,$$

$$17,1x_1 + 20,3x_2 + 5,4x_3 \leq 100.$$

Разработанная методика может быть использована при планировании выпуска продукции предприятием в особых условиях.

Программа ЭВМ в пакете Mathcad для этой задачи с конкретным (рисунок 2.4) выбором ингредиентов имеющих определенные показатели по белково-жировому и углеводному содержанию будет иметь вид

$$f(x_1, x_2, x_3) := 250x_1 + 150x_2 + 295x_3$$

$$x_1 := 1 \quad x_2 := 1 \quad x_3 := 1$$

Given

$$7.1x_1 + 10.9x_2 + 10.8x_3 \geq 50$$

$$7.1x_1 + 10.9x_2 + 10.8x_3 \leq 50$$

$$8.3x_1 + 15.6x_2 + 8.8x_3 \geq 55$$

$$8.3x_1 + 15.6x_2 + 8.8x_3 \leq 55$$

$$17.1x_1 + 20.3x_2 + 5.4x_3 \geq 75$$

$$17.1x_1 + 20.3x_2 + 5.4x_3 \leq 75$$

$$x_1 > 0 \quad x_2 > 0 \quad x_3 > 0$$

$$\text{Minerr}(x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} 2.313 \\ 1.257 \\ 1.841 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.4 – Расчет рациона пищи с рекомендуемым составом ингредиентов

В таких обстоятельствах необходимы рациональное использование запасов сырья и минимальное количество отходов, минимизирующих экологическое загрязнение среды. Она также может быть полезна технологам при разработке номенклатуры производимых продуктов питания. Следует отметить, что предлагаемый подход к разработке меню учитывает рекомендованные ВОЗ нормы потребления полезных продуктов питания, в

данном случае хлебобулочных изделий, и является максимально объективным для разных видов особых условий [120].

В случаях, когда выпускаемая продукция полноценного питания требует обогащения путем введения минеральных веществ, в качестве добавки предлагается использовать измельченную яичную скорлупу.

В последние годы в нашей стране и за рубежом проводятся работы по изучению потенциальных возможностей этого вторичного пищевого сырья в функциональных продуктах. Перспективным представляется использование вторичного сырья птицеперерабатывающей промышленности, особенно яичной скорлупы, в качестве ингредиентов для выпечки хлебобулочных изделий. Содержащие большое количество различных минеральных веществ и особенно кальция печенье или другие хлебобулочные и кондитерские изделия незаменимы в питании детей, наиболее остро нуждающихся в этом минерале.

Исследования позволили более полно понять сложный механизм приготовления теста с равномерным распределением этой важной пищевой добавки. При смешивании отдельных ингредиентов их рекомендуется подвергать воздействию кавитационному воздействию, инициируемому посредством магнитострикторов при определенных режимах реализации электромагнитного эффекта. Это обеспечивает долговременную стабильность и равномерное молекулярное распределение кальция в белково-жировых эмульсиях, используемых при замесе теста [51,119,121].

Большое внимание отечественных ученых было уделено изучению состава скорлупы куриного яйца и возможности его использования для повышения пищевой ценности продуктов питания. Скорлупа яйца усвояема организмом и богата макро- и микроэлементами и на 90 % [125,126] состоит из карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), а также фтора, меди, железа, марганца, фосфора, серы, цинка, кремния и других веществ. Свойства яичной скорлупы изучены на предмет длительного использования, однако специализированные предприятия по производству хлебобулочных изделий до настоящего времени не использовали выявленные ценные свойства этого

второго сырья в промышленных масштабах в связи с проблемой его тонкого измельчения. Но данную проблему можно решить, заменив сильное механическое воздействие на оболочку яиц более мягким гидродинамическим воздействием, например при использовании эффектов кавитации в процессе ее измельчения [117, 121].

Стремление сохранить наиболее высокие полезные свойства продуктов стимулирует разработку, обеспечивающую наибольшую равномерность распределения компонентов используемых рецептов, без учета воздействия высоких температур на готовую продукцию, в том числе неоправданного повышения температуры по сравнению с установленными режимами в правилах классической выпечки [121].

## **2.2 Математическая модель модернизированной рамной мешалки электромагнитного и акустического действия для производства обогащенных белково-жировых эмульсий**

Сохранению однородности смеси при подготовке теста для производства обогащенного хлеба служит, например, устройство, схема месильного органа которого приведена на рисунке 2.5 [121].

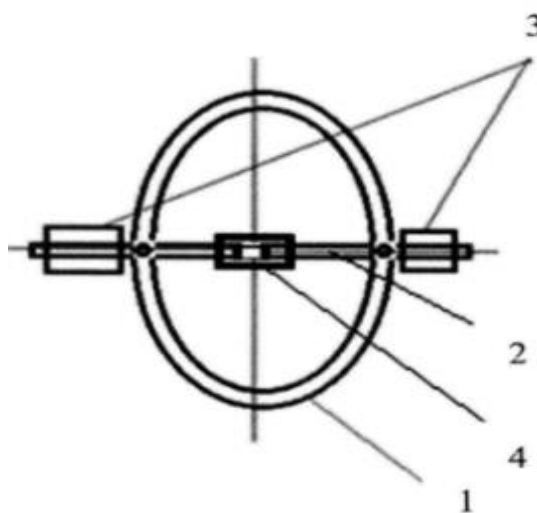


Рисунок 2.5 – Конструкция месильной камеры [82]:

1 – полуэллипсы; 2 – ферромагнитные стержни; 3 – электрические катушки; 4 – неметаллическая втулка

Месильный орган [121] этой конструкции работает следующим образом: сначала в камеру загружают жидкие рецептурные компоненты, их перемешивают, затем загружают муку, камеру закрывают крышкой, включают электропривод, вал с насаженным на него месильным органом 1 начинает вращаться со скоростью  $8,3-13,3 \text{ с}^{-1}$  [84]. Одновременно на электрические катушки магнитострикционных элементов 3 подается электрический ток, под действием которого полувалы 2, выполняющие в магнитострикционных элементах роли сердечников начинают совершать продольные колебания с частотой подаваемого напряжения, возбуждая ультразвуковое поле (УЗ) (уровня звукового давления – 140 дБ при частоте  $22 \pm 1,65 \text{ кГц}$ ). Неметаллическая втулка 4 обеспечивая синхронность работы двух магнитострикционных элементов 3, не мешает распространяться ультразвуковому полю по всему объему камеры. Возникающие при этом кавитационные явления разрушают любые неоднородности в перемешиваемой среде и обеспечивают высокую равномерность распределения отдельных ингредиентов. Перемешивание осуществляют до получения однородной консистенции в течение 4-8 мин в зависимости от рецептуры. Затем в камеру подают сжатый воздух под давлением 0,4 МПа, в рубашку охлаждения - проточную водопроводную воду и осуществляют сбивание приготовленного теста в течение 4-8 мин в зависимости от рецептуры при той же частоте вращения месильного органа. После чего тесто выгружают в формы и подают на выпечку [84,118].

Интенсификация процесса обусловлена тем, что в ходе приготовления сбивного бездрожжевого хлеба нет необходимости в использовании тестоделительной машины, шкафа предварительной расстойки теста и других машин, используемых в традиционном хлебопечении, что в свою очередь позволяет уменьшить производственные площади, а так же время, затрачиваемое для приготовления хлеба. Наличие в перемешиваемой среде ультразвукового поля разрушающего адгезионные связи теста со стенками камеры, позволяет не мыть камеру перед каждым замесом, т.к. слой теста,

оставшегося на стенке камеры, минимален и не влияет на качество готового продукта при следующем замесе. Это позволяет снизить время, затрачиваемое на обслуживание камеры. Таким образом, время приготовления теста с использованием предлагаемого месильного органа составит 8-16 мин (в зависимости от рецептуры). Задачей исследования являлось исключение неравномерности распределения отдельных ингредиентов при перемешивании рецептурных компонентов [121].

Инициирование процесса перемешивания и обеспечение равномерности смеси обеспечивается полным разрушением ее структуры за счет возникновения кавитационных явлений иницируемых электромагнитным эффектом катушек 3 обеспечивающим повышенную скорость вращения ферромагнитных стержней [4-5].

В случае кавитационного разрушения структуры смеси это приводит к необходимости учета разрыва векторов скорости потока жидкости и действия центробежных сил, разрушающих объект. Это связано с тем, что обтекание компонентов дисперсной пищевой добавки зачастую осуществляется турбулентным, а не ламинарным потоком. Самый простой способ объяснить эти ситуации – предположить определенный угол  $\alpha$  между векторами скорости потока жидкости и центробежными силами, что приводит к некоторой модификации исходных дифференциальных уравнений [125].

Силы, вызывающие такое движение, обычно выражаются как функции окружной скорости кругового движения частицы жидкости. Эти компоненты скорости определяются из уравнения движения частиц жидкости, описанного ниже [125]:

$$\psi = q_{\Pi} \left( \frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{r^2} \right), \quad (2.7)$$

где  $\psi$  – функция тока;

$x, y$  – текущие координаты жидкой частицы в декартовой системе;

$r$  – радиус окружности, по которой движется жидкая частица;

$q_{\Pi}$  – постоянный параметр.

При указанных условиях составляющая окружной скорости вдоль оси  $Ox$  будет равна

$$U_x = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{2q}{r^2} y, \quad (2.8)$$

а составляющая вдоль оси  $Oy$  определится как

$$U_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = -\frac{2q}{r^2} x. \quad (2.9)$$

В этом случае проекции силы равномерного движения жидкости по окружным траекториям на оси координат представляют таким образом:

$$N_x = k_1 \cdot u_x = k_1 \cdot \frac{2q}{r^2} y = c_1 y; \quad (2.10)$$

$$N_y = k_2 \cdot u_y = k_2 \cdot \frac{2q}{r^2} x = c_2 x, \quad (2.11)$$

где  $k_1; k_2; c_1; c_2$  – постоянные коэффициенты [125].

В действительности рассматриваемое движение жидкости в отдельных кавернах является неравномерным в течение периода её обращения за счёт возникающих при этом сил сопротивления [125].

Таким образом, во-первых, необходимо учесть внутреннюю силу сопротивления движению жидкости в каверне, возникающую от влияния вязкости, благодаря которой главным образом происходит диссипация энергии, накопленной жидкостью в каверне от транзитного потока.

Во-вторых, кроме указанных сил, также должны быть учтены силы сопротивления, возникающие на поверхности раздела между транзитным потоком и жидкостью в каверне. Эти силы можно записать в виде функции относительной скорости движения жидкости на поверхности раздела, выразив её через скорость транзитного потока  $v_0$  и соответствующую неравномерность окружной скорости движения жидкости в дефекте вдоль оси  $Ox$   $\frac{dx}{dt}$ . В соответствии с этими рассуждениями получаем систему неоднородных нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка [125]:

$$m \frac{d^2 m}{dt^2} + \lambda \left( \frac{dx}{dt} \right)^n - c_1 y = \varphi \left( v_0 - \frac{dx}{dt} \right); \quad (2.12)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \left( \frac{dy}{dt} \right)^n + c_2 x = 0. \quad (2.13)$$

В соответствии с известными рекомендациями по численному решению неоднородных нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка сведем их к решению системы дифференциальных уравнений первого порядка, выполнив замену переменных [49]:

$$x = y_0; \quad \frac{dx}{dt} = y_1 \quad y = y_2 \quad \frac{dy}{dt} = y_3. \quad (2.14)$$

После такой замены традиционную систему уравнений можно переписать в виде, учитывающим наличие турбулентности обтекающего потока путем умножения на синус угла между горизонтальной осью и направлением действительной скорости  $S$ :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} y_0 &= y_1; & \frac{d}{dx} y_1 &= -0,2y_1 + 0,2y_2 + 0,1(C \cdot \sin \alpha - y_1), \\ \frac{d}{dx} y_2 &= y_3; & \frac{d}{dx} y_3 &= -0,2y_3 - 0,3y_0. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Значения постоянных коэффициентов при переменных выбраны условно в целях исследования влияния на состояние среды в каверне скорости транзитного потока (для  $C$  начальным, при  $\alpha = 0$  выбрано значение 10).

Записанную таким образом систему дифференциальных уравнений решали, выбирая граничные условия из соображений постоянства среды в каверне [49, 62]:

$$y_0(0) = 0; \quad y_1(0) = 0; \quad y_2(0) = 0; \quad y_3(0) = 1.$$

Для получения решений записанной системы уравнений традиционный метод Рунге-Кутты дает достаточно существенные погрешности, а для некоторых значений коэффициентов – расходится [112].

В связи с этим для решения системы записанных дифференциальных уравнений использовался метод Булирша-Штера.

Этот метод [39] не только более экономичен с точки зрения использования ресурсов вычислительной системы, но и дает возможность построения фазового портрета решения системы для определения наличия возможного аттрактора (рисунок 2.6).

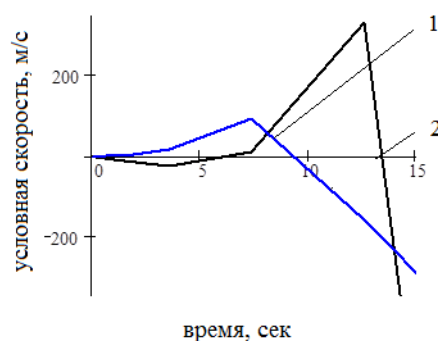


Рисунок 2.6 – Изменение скоростей движения границ полости в процессе кавитации:

1 – по оси  $OX$ ; 2 – по оси  $OY$  (при  $S_{тр} = 100$ ,  $\alpha = 0$ )

При наличии необходимого объема экспериментальных данных статистическая обработка полученных значений методом наименьших квадратов позволит найти компоненты скорости по координатам  $x$  и  $y$ , а зная их вычислить саму скорость. По величине скорости можно посчитать значение действующей на стенки каверны центробежной силы  $F_{cr}$  по известной формуле

$$F_{cr} = \frac{mV^2}{r}. \quad (2.16)$$

Дифференцируя полученную зависимость, легко определить время, при котором величина центробежной силы будет достигать экстремальных значений для каждой заданной величины транзитной скорости  $S_{тр}$  [125].

Анализ графиков полученных решений приводит к интересным результатам. Наличие резких точек различия величин проекций скорости и их значений не исключает присутствия притяжения на фазовом этапе решения. Поскольку решение системы четырехмерное, графически представить этот факт невозможно. В то же время экспериментальная интерпретация числовых величин, введенных в систему как коэффициенты, может привести к результатам, полученным для конвективно-турбулентных потоков жидкости в смесителе, о возможности определения точки бифуркации, определяющей наиболее рациональные режимы кавитационного процесса.

Для этой цели рассмотрим модель, позволяющую интерпретировать наличие угла  $\alpha$  между направлением транзитной скорости  $S_{тр}$  и продольной

осью каверны при ее образовании за счет импульса ультразвука (УЗ), представленного на рисунке 2.7.

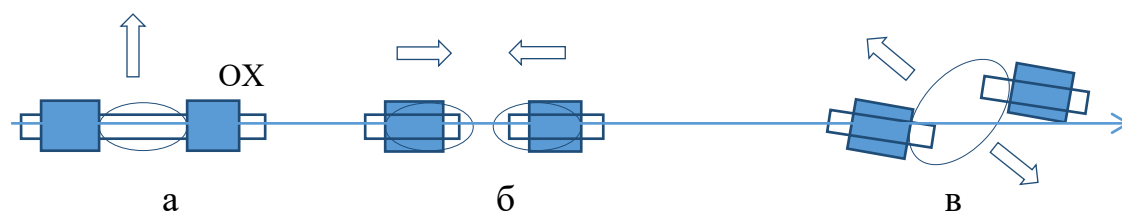


Рисунок 2.7 – Возникновение квитанционной волны при электромагнитном импульсе:

- а – магнитоотрицательный элемент со сплошным сердечником;
- б – магнитоотрицательный элемент с разомкнутым сердечником;
- в – магнитоотрицательный элемент с разомкнутым смещенным сердечником

В рамках такой модели становится понятным влияние угла  $\alpha$  на изменение скоростей движения границ полости в процессе кавитации. В самом деле, выполнив решение систем записанных уравнений для разных значений этого угла, получим следующие данные, представленные на рисунке 2.8.

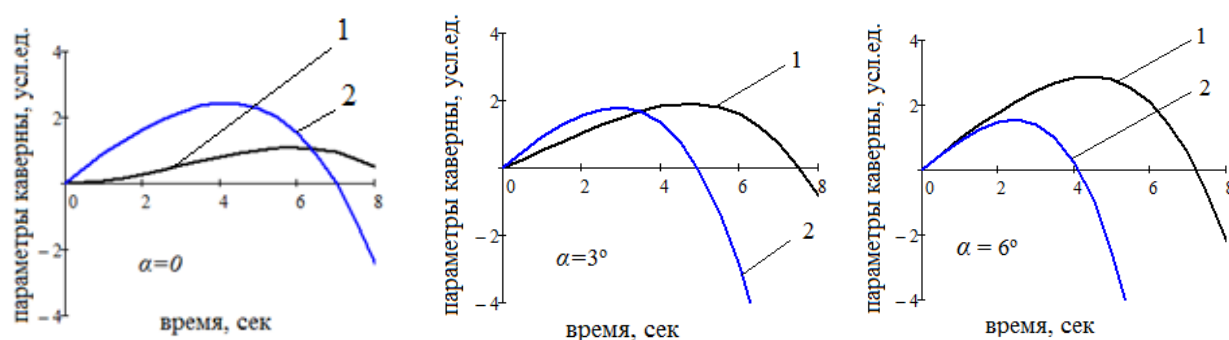


Рисунок 2.8 – Характер изменения размера каверны (1) и скорости движения кавитационной волны (2)

Анализируя полученные зависимости, можно заметить, что смещение полуосей разомкнутого сердечника магнитоотрицательного механизма существенно влияет на инициируемые кавитационные явления в процессах развития равномерности связи [125].

С увеличением угла смещения увеличиваются размеры каверны вплоть до ее «схлопывания» и уменьшается скорость самого роста каверны. Вместе

с тем увеличение угла смещения для инициирования процесса кавитации требует повышения мощности электромагнитного разряда. Таким образом, конкретные характеристики устройства в каждом случае должны подбираться на основании эксперимента.

Мешалку описанного типа испытывали на смеси для белково-жировой композиции масс. % (от общей массы теста): соль – 1,04-1,12, сахар-песок – 17,22-17,62, жировая фаза – 25,0-28,38, меланж – 5,24-6,18 [110].

Подготовка образцов осуществлялась тремя способами: без обработки УЗ и при нагреве от 20°C до 120°C в течение 60 минут, с обработкой УЗ во время перемешивания и таком же нагреве до 120°C в течение 60 минут, а также с обработкой УЗ (уровня звукового давление – 140 дБ при частоте  $22 \pm 1,65$  кГц) во время перемешивания и при нагреве от 20°C до 120°C в течение 30 минут. Вид испытанных экспериментальных образцов приведен на рисунке 2.9 [110].

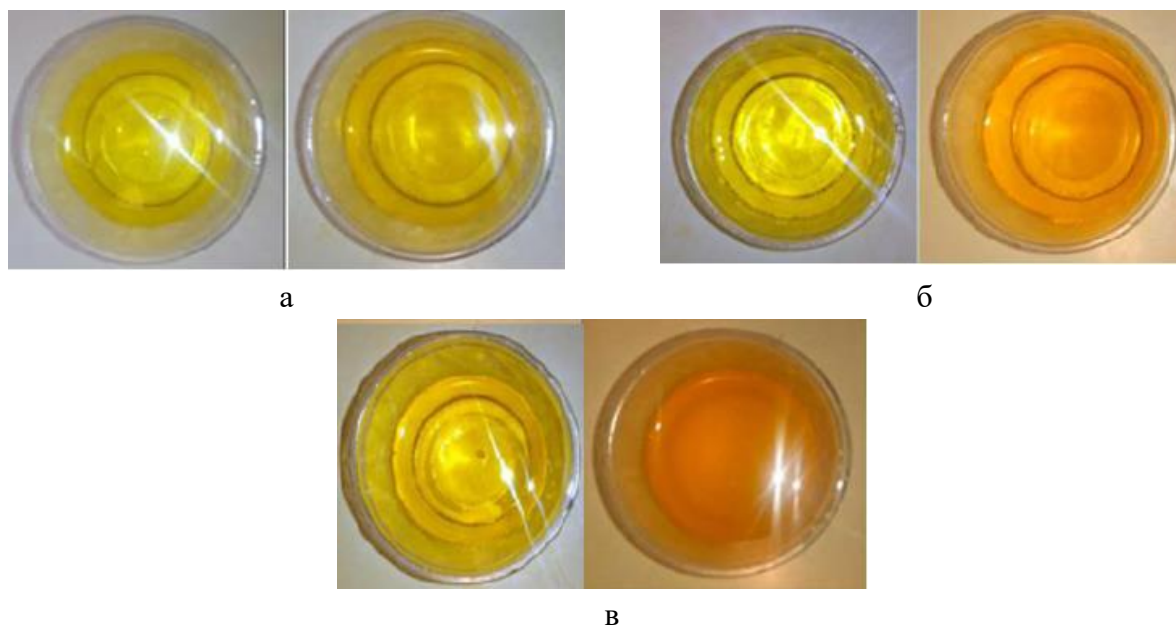


Рисунок 2.9 – Образцы белково-жировой композиции после нагрева до 120°C:  
а – без обработки УЗ при нагреве в течение 60 мин; б – с обработкой УЗ при перемешивании и нагреве в течение 60 мин; в – с обработкой УЗ при перемешивании и нагреве в течение 30 мин

Визуальный осмотр испытанных образцов подтвердил предположения о равномерности перемешивания отдельных ингредиентов по равномерности цветовой гаммы у каждого из образцов, которые после термообработки не

выявили очагов неравномерности протекания реакции меланоидинообразования. Образцы первого типа незначительно изменили свой цвет в силу произвольного распределения белков, жиров и углеводов сложившегося при подготовке образцов и сравнительно щадящего темпа изменения электромагнитных импульсов.

Второй тип образцов, подвергнутый УЗ воздействию при перемешивании, в силу инициируемых в смесительной камере кавитационных процессов, обеспечил более равномерный контакт белков и углеводов и при том же темпе нагрева проявил более интенсивную окрашенность. И, наконец, третий тип образцов в условиях воздействия кавитации и резком увеличении темпа нагрева (моделирующего несанкционированный температурный скачок) получил наиболее интенсивную окраску. Одновременно появился характерный запах подгоревшего жира, что недопустимо для продукции функционального питания [110].

Выполненные исследования подтвердили необходимость контролировать равномерность перемешивания ингредиентов белково-жировых композиций для хлеба и выпечных мучных кондитерских изделий.

### **2.3 Математическая модель модернизированной пекарной камеры электромагнитного и акустического действия для выпечки обогащенного хлеба в особых условиях**

Последовательное решение проблем совершенствования функционального питания не ограничивается корректировкой рецептур приготовления блюд. Не менее важными являются исследования по совершенствованию технологического оборудования, предотвращающего потери ценных питательных веществ при переработке пищевого сырья, а также предотвращения появления канцерогенных или других вредных химических соединений, недопустимых в функциональном питании [125].

Например, в этом вопросе многие исследователи большое внимание уделяют процессам формирования меланоидов, которые сейчас очень хорошо изучены. Однако при определении методов термической обработки хлебобулочных изделий часто возникают технологические проблемы. Это связано с тем, что повышение температуры ускоряет реакцию образования меланоидов с появлением интенсивной окраски при разных скоростях нагрева тестовых заготовок. Между тем нагревание некоторых смесей выше 150 °С способствует разрушению важных питательных компонентов, таких как аминокислоты. Отмечено, что содержание меланоидинов сильно зависит от температуры нагрева и их образование значительно ускоряется при влажности тестовых заготовок менее 70 % [133].

Эти условия важны из-за изменения белкового состава, обнаруживаемого в таких полуфабрикатах наряду с углеводами. В то же время в процессе полимеризации и конденсации цветное изменение поверхности изделия влияет на снижение биологической ценности компонентов и продуктов.

Преобразования как свободных аминокислот, так и сахаров в реакции меланоидинообразования изучались большим количеством авторов, и их закономерности описаны во многих работах. Изменение относительного содержания свободных аминокислот в муке, сбивном тесте и хлебе в динамике реализуемых процессов выпечки приведено авторами [110].

Традиционная выпечка мучных кондитерских изделий снижает биологическую ценность белков теста на 5–30 % в зависимости от варьирования теплового режима в выпечной камере и содержания сахара в тестозаготовке. Большинство авторов, исследовавших этот процесс, отмечают изменения характера термической обработки на биологическую ценность содержащегося белка. Распространено мнение, что аминокислотный состав белков при их кислотном гидролизе в основном не изменяется. В качестве исключений приводятся примеры обработки, реализованной при достаточно высоких температурах. По-видимому, это

является следствием того, что при термической обработке белковых продуктов происходит соединение аминокислот с другими составляющими с изменением физико-химических свойств белков. Возможно, это и объясняет значительные потери биологической ценности белков при довольно медленно протекающей реакции меланоидинообразования. Кроме того, имеются предположения о том, что некоторые из получаемых продуктов этих реакций могут быть токсичными [110].

Указанные особенности поведения и свойства меланоидинов сегодня не позволяют говорить однозначно о положительном или отрицательном их влиянии на конечные свойства получаемых продуктов. Вместе с тем хотя, с одной стороны, протекание реакции является причиной определенного снижения биологической ценности белков, с другой стороны, они достаточно благоприятно влияют на внешний вид, запах, вкус готовых блюд и кулинарных изделий [110].

Приведем пример методики расчета выпечной камеры с ЭК-нагревом заключается в учете синергетического эффекта, полученного в результате электроконтактного подвода теплоты и воздействия инфракрасного излучения на тестозаготовку при выпечке хлеба [85,125].

Структура методики приводится ниже.

Математическая постановка задачи сводится к построению уравнения нестационарного теплового режима полуфабриката с внутренними источниками теплоты, которые имеют вид

$$F^2 t_{\text{пф}} + \frac{\varsigma}{c_{\text{пф}}} = \frac{c_{\text{пф}} \rho_{\text{пф}}}{c_{\text{пф}}} \cdot \frac{dt_{\text{пф}}}{d\tau}, \quad (2.17)$$

где  $F$  – движущая сила массообменного процесса;

$\rho_{\text{пф}}$  – плотность полуфабриката, кг/м<sup>3</sup>;

$c_{\text{пф}}$  – теплопроводность полуфабриката, Вт/м·К;

$t_{\text{пф}}$  – температура тепловой обработки полуфабриката, °С;

$d$  – толщина полуфабриката, м;

$q_{\text{те}}$  – удельная теплоемкость полуфабриката, Дж/кг·К;

$\tau$  – время тепловой обработки, с;

$\varsigma$  – плотность мощности тепловыделений в полуфабрикате, Вт/м<sup>3</sup>.

Электроконтактный способ подвода теплоты, при котором все слои полуфабриката прогреваются равномерно, а теплообмен с парогазовой средой пекарной камеры протекает по закону Ньютона-Рихмана, зависимость (2.19) [117, 125] можно представить

$$\frac{lt}{l\tau} + \tau_{\text{наг}}(t - t_{\text{ос}}) = \frac{NV}{q}, \quad (2.18)$$

где  $q$  – удельное количество теплоты для выпечки хлеба, Дж/К;

$\tau_{\text{наг}} = \frac{\beta\delta}{q}$  – темп нагрева, с<sup>-1</sup>;

$\beta$  – коэффициент конвективно-лучистого теплообмена с окружающей средой, Вт/м<sup>2</sup>К;

$\delta$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;

$V$  – объем полуфабриката, м<sup>3</sup>;

$t_{\text{ос}}$  – температура окружающей среды, °С.

Решение зависимости (2.20) можно представить в следующем виде [125]

$$t(\tau) = t_0 e^{-\tau_{\text{наг}}\tau} + \tau_{\text{наг}} e^{-\tau_{\text{наг}}\tau} \int_0^\tau e^{\tau_{\text{наг}}\tau} \left( t_{\text{ос}} - \frac{NV}{\tau_{\text{наг}}q} \right) d\tau. \quad (2.19)$$

Для определения результирующей мощности, подводимой к полуфабрикату, используется зависимость

$$P(t_{\text{пф}}) = P_{\text{фхп}}(t_{\text{пф}}) + P_{\text{рив}}(t_{\text{пф}}) + P_{\text{пф}}(t_{\text{пф}}) + P_{\text{ос}}(t_{\text{пф}}), \quad (2.20)$$

где  $P(t_{\text{пф}})$  – полная мощность, подводимая к полуфабрикату, Вт;

$P_{\text{фхп}}(t_{\text{пф}})$  – мощность, расходуемая на физико-химические процессы, протекающие во время выпечки, Вт;

$P_{\text{пф}}(t_{\text{пф}})$  – мощность, расходуемая на нагрев массы теста теплоемкостью, Вт;

$P_{\text{рив}}(t_{\text{пф}})$  – мощность, расходуемая на испарение влаги, Вт;

$P_{\text{ос}}(t_{\text{пф}})$  – мощность, теряемая в окружающую среду во время нагрева, Вт.

Расход энергии ( $P_3$ ) на нагрев тестозаготовки составляет незначительную часть от потребляемой мощности:

$$P_э = q(t_{\text{кон}} - t_{\text{н}}), \quad (2.21)$$

где  $t_{\text{кон}}$  – температура конечная, °C;

$t_{\text{н}}$  – температура начальная, °C.

Сила тока и продолжительность тепловой обработки влияют на затраты энергии при электроконтактном подводе теплоты. Расчет энергозатрат  $N_э$  осуществляется по зависимости

$$N_э = \varphi \int_0^t i l \tau, \quad (2.22)$$

где  $N_э$  – затраты энергии на выпечку, Дж;

$\varphi$  – напряжение, В;

$i$  – сила тока, А.

Типовой график изменения силы тока при ЭК-подводе теплоты к тестозаготовке приведен на рисунке 2.10.

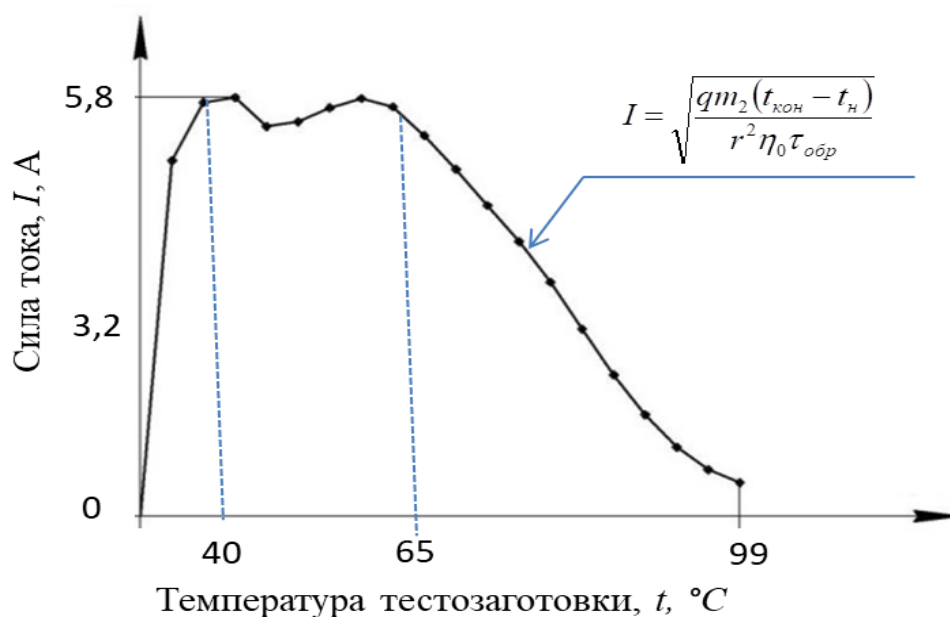


Рисунок 2.10 – Типовой график изменения силы тока в процессе выпечки:  $m_2$  – масса тестозаготовки, кг;  $t_{\text{кон}}$  – конечная температура тестозаготовки, °C;  $t_{\text{н}}$  – начальная температура тестозаготовки, °C;  $\eta_0$  – коэффициент, учитывающий общие потери энергии;  $\tau_{\text{обп}}$  – продолжительность тепловой обработки;  $q$  – удельное количество теплоты для выпечки хлеба

Следует отметить [126], что расход тепловой энергии на производство хлеба в зависимости от его массы будет изменяться, при этом на единицу массы полуфабриката будет постоянной величиной. Эта величина будет равна площади

интеграла изменения силы тока  $i$  по времени, деленному на напряжение  $\varphi$  при выпечке, что позволяет сделать вывод о том, что интеграл тока по времени тоже является постоянной величиной для единицы массы хлеба [59]:

$$N = \varphi \int_0^{t_{\text{тз}}} i l t_{\text{тз}} = \text{const},$$

$$\varphi = \text{const} = 220 \text{ В}.$$

Приведенная выше информация позволяет сделать вывод, что, поскольку площадь интеграла является постоянной величиной, повышение силы тока  $i$  при выпечке электроконтактным способом позволяет достичь сокращение продолжительности перехода теста-хлеб. Вышеперечисленное позволяет сделать вывод, что при ЭК-подводе теплоты к полуфабрикату существует взаимосвязь между  $I_{\text{max}}$ ,  $\tau_{\text{обр}}$  и затратами энергии  $N_{\text{э}}$ , которая имеет следующее выражение:

$$N_{\text{э}} = I_{\text{max}} \tau_{\text{обр}} \mu, \quad (2.23)$$

где  $N_{\text{э}}$  – энергозатраты на переход теста-хлеб, кДж;

$I_{\text{max}}$  – максимальная сила тока при переходе теста-хлеб, А;

$\tau_{\text{обр}}$  – продолжительность перехода теста-хлеб, с;

$\mu$  – коэффициент пропорциональности [108].

Процесс (показатели) тепловой обработки полуфабриката влияют на коэффициент пропорциональности  $\mu$ .

Наиболее ярко выраженным и активно влияющим показателем тепловой обработки является продолжительность тепловой обработки полуфабриката  $\tau_{\text{вып}}$ . Необходимо отметить, что она имеет невысокий интервал значений. Это связано с тем, что температура слоев полуфабриката максимально достигает  $t = 98-99,5^\circ\text{C}$ , причем не за короткий промежуток времени, а по истечении определенного времени. Продолжительность тепловой обработки полуфабриката может изменяться, т.к. условия (температура окружающей среды, влажность и др.), в которых функционирует хлебопекарная печь, различные, также на это влияют и показатели полуфабриката (влажность теста, размеры, масса, состав смеси

муки и др.). Нельзя недооценивать и другие показатели, влияющие на процесс перехода теста-хлеб, например, такие как температура парогазовой среды внутри пекарной камеры, способ приготовления теста, показатели качества ингредиентов и т.д.

При выпечке хлеба с использованием ЭК-подвода теплоты напряжение  $\varphi$  остается постоянным. Сопротивление  $R_э$ , в свою очередь, можно определить по зависимости [117]

$$R_э = \frac{\rho_T L}{S'}, \quad (2.24)$$

где  $\rho_T$  – удельное сопротивление теста, Ом·м;

$L$  – расстояние между электродами, м;

$S'$  – площадь поперечного сечения проводника для тестозаготовки – произведение длины и высоты тестозаготовки, м<sup>2</sup>.

Кинетика процесса электроконтактной выпечки хлеба представлена на рисунке 2.11.

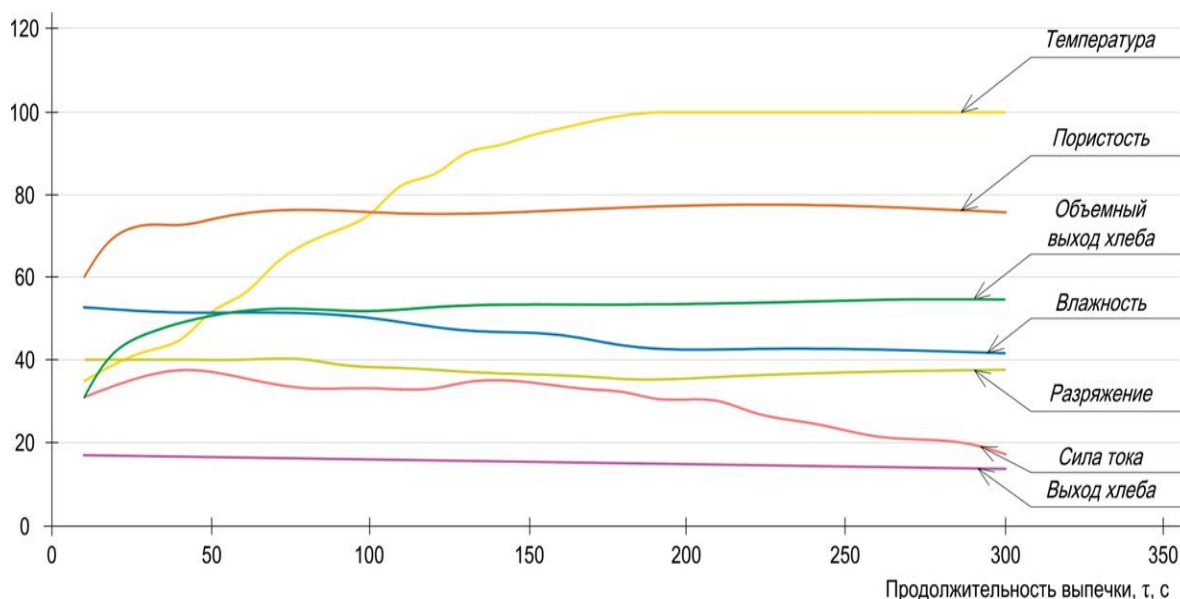


Рисунок 2.11 – Кинетика процесса электроконтактной выпечки хлеба

На втором этапе определяется влияние инфракрасного излучения на сохранение пищевой ценности исходного сырья.

Подвергая тестозаготовку инфракрасному ИК-излучению (длина волны от 3 до 4 мкм), генерируемая тепловая энергия поглощается внешними слоями тестозаготовки [117]. Такие характеристики инфракрасного нагрева,

как эффективность, длина волны и отражательная способность, эффективно воздействуют на процесс перехода теста-хлеб [122, 128].

Принципиальная схема инфракрасного энергоподвода в технологии обработки тестозаготовки показана на рисунке 2.12.

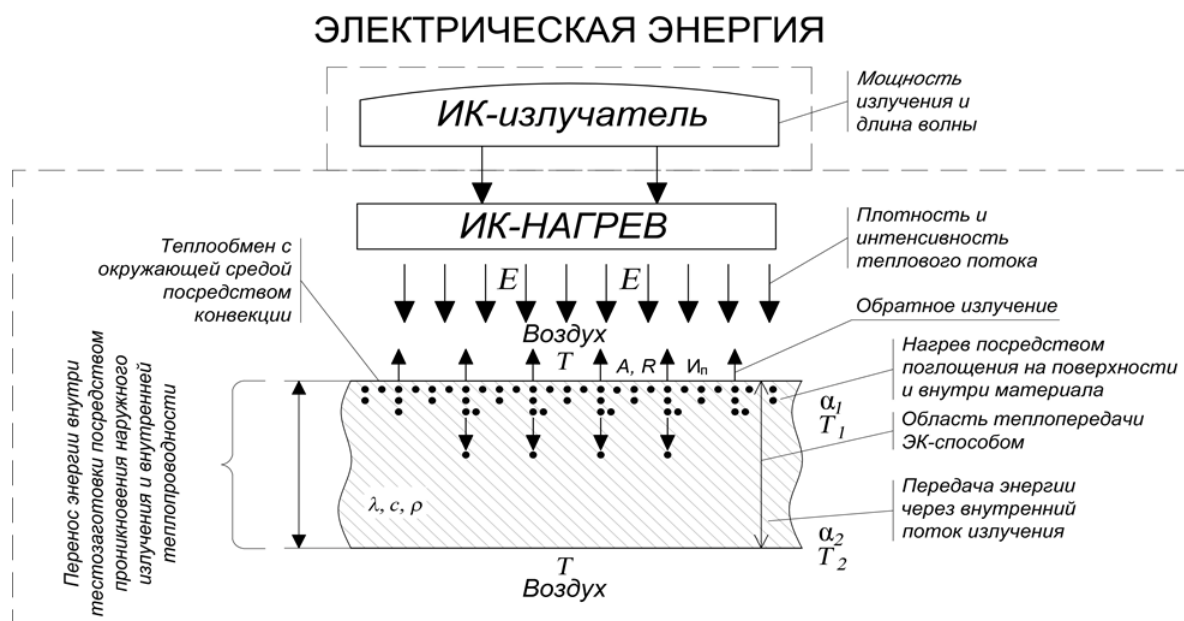


Рисунок 2.12 – Принципиальная схема ИК-энергоподвода в технологии обработки тестозаготовки:

$T$  – соответственно температура воздуха (сверху, снизу);  $\lambda$  – теплопроводность тестозаготовки;  $A$  – поглощательная способность верхней поверхности;  $R$  – отражательная способность верхней поверхности;  $I_{II}$  – излучательная способность верхней поверхности;  $\alpha_1$  – коэффициент теплопередачи «воздух-материал» (сверху);  $\alpha_2$  – коэффициент теплопередачи «воздух-материал» (снизу);  $E$  – интенсивность излучения;  $T_1$  – температура верхней поверхности;  $T_2$  – температура нижней поверхности;  $c$  – удельная теплоемкость тестозаготовки;  $\rho$  – плотность тестозаготовки,  $d$  – толщина тестозаготовки

Пищевые системы представляют собой сложные смеси различных биохимических молекул, биологических полимеров, неорганических солей и воды. Инфракрасные спектры таких смесей возникают из-за механических колебаний молекул или определенных молекулярных агрегатов в рамках очень сложного явления взаимного перекрытия. Аминокислоты, полипептиды и белки обнаруживают 2 сильные полосы поглощения, расположенные на 3-4 и 6-9 мкм. С другой стороны, липиды демонстрируют

явления сильного поглощения по всему спектру инфракрасного излучения с 3 более сильными полосами поглощения, расположенными на 3-4, 6 и 9-10 мкм, тогда как углеводы дают 2 сильные полосы поглощения с центрами 3 и 7-10 мкм.

Количество ИК-излучения, падающего на поверхность тестозаготовки, имеет спектральную зависимость.

Энергия, выходящая из излучателя (рисунок 2.13), состоит из разных длин волн и доли излучения в каждой полосе в зависимости от температуры и излучательной способности нагревательного элемента [117,129].

Длина волны, на которой происходит максимальное излучение, определяется температурой инфракрасных излучателей.

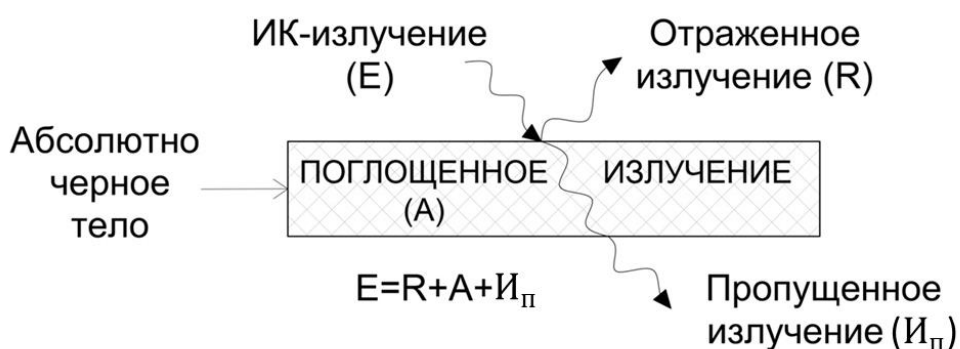


Рисунок 2.13 – Погашение излучения (поглощение, пропускание и отражение)

В методике для исследования этой зависимости применен закон Планка, устанавливающий характер спектра излучения абсолютно черного тела,  $E_{0f}$  [125]:

$$E_{0f} = 2\pi \frac{bf}{s_0^2} - \frac{1}{\exp\left(\frac{bf}{\delta T}\right) - 1}, \quad (2.25)$$

где  $E_{0f}$  – спектральные плотности излучения абсолютно черного тела;

$f$  – частота, Гц;

$b$  – постоянная Планка =  $6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;

$s_0^2$  – скорость света ( $s = 0,7c_0$ ),  $s = 2,9977 \cdot 10^8$  м/с;

$\delta$  – постоянная Больцмана =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

$T$  – температура, К.

По закону смещения Вина длина волны  $\lambda_{\text{макс}}$ , на которую приходится максимум энергии в спектре равновесного излучения (излучения абсолютно чёрного тела), обратно пропорциональна абсолютной температуре  $T$  излучающего тела [117]:

$$\lambda_{\text{макс}} = \frac{c}{T}, \quad (2.26)$$

где  $c \approx 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина.

При этом закон Стефана-Больцмана определяет для абсолютно черного тела зависимость интегральной плотности потока излучения от температуры. Хотя искомое выражение  $E_0$  определяется просто суммированием (интегрирование) энергии по сектору закона Планка

$$E_0 = \delta_0 T^4, \quad (2.27)$$

где  $\delta_0 = 5,64 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Достижение безопасности функциональных ингредиентов в хлебобулочных изделиях достигается за счет щадящих технологических приемов обработки и одновременного сочетания нескольких технологических приемов. За счет снижения температуры парогазовой среды внутри пекарной камеры и продолжительности выпечки (ЭК-теплоснабжения) достигается получение функциональных пищевых продуктов с сохранением полезных веществ исходного сырья и пищевых добавок (витаминов) [125].

Этот комбинированный метод можно использовать, например, для снижения потерь пищевой добавки, такой как бета-каротин в хлебе.

Необходимо отметить, что к числу функциональных пищевых добавок можно отнести бета-каротин, широко применяемый при производстве продуктов питания. Его преимуществом является то, что он важен для функционирования организма человека, а также часть данного вещества переходит в витамин А. Из недостатков можно отметить слабую защиту под воздействием света, кислорода и высоких температур [54], в связи с чем подвод теплоты электроконтактным способом является наиболее

приемлемым для производства хлеба с повышенным содержанием нутриентов.

Следует отметить, что пищевые вещества наиболее эффективно поглощают энергию длинноволнового инфракрасного излучения через механизм изменения колебательного состояния молекул, который может приводить к радиационному нагреву. Вода и органические соединения, такие как белки и крахмалы, которые являются основными компонентами пищи, поглощают энергию на длинах волн более 2,5 мкм.

Расчёт энергетической ценности (по содержанию белков, жиров и т.д.) в готовом продукте питания можно осуществить по зависимости

$$Q(z) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m k_{ij}^0 y_j^0 - \sum_{j=1}^m k_{ij} y_j)^2 \rightarrow \min, \quad (2.28)$$

где  $k_{ij}^0$  – удельное содержание  $i$ -го элемента химического состава (белка, жира, влаги и т.д.) в  $j$ -м ингредиенте до обработки;

$y_j^0$  – содержание  $i$ -го элемента пищевой ценности до обработки;

$k_{ij}$  – удельное содержание  $i$ -го элемента химического состава (белка, жира, влаги и т.д.) в  $j$ -м ингредиенте в приготовленном продукте питания;

$y_j$  – массовая доля  $j$ -го ингредиента в приготовленном продукте питания.

Для выбора наилучшего способа комплексного воздействия полей на обработку продуктов питания применяется критерий оценки качества продовольствия после его обработки, выражаемый многомерной суммой взвешенных нормированных отклонений параметров  $K$  состояния продукта от их значений до обработки [117]:

$$K = \sum_{i=1}^m \xi_i \left( 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^n b_{ij} \left( \frac{y_{ij}^0 - y_{ij}}{\Delta y_{ij}} \right)^2} \right), \quad (2.29)$$

где  $\xi_i$  – коэффициент значимости  $i$ -й группы факторов;

$b_{ij}$  – весовой коэффициент отклонения  $j$ -го фактора  $i$ -й группы;

$y_{ij}^0$ ,  $y_{ij}$  – значение параметра состояния  $j$ -го фактора  $i$ -й группы до и после

термообработки;

$\Delta y_{ij}$  – допустимое отклонение параметра от желаемого значения.

На четвертом этапе осуществляется расчет геометрических параметров основных элементов конвейерной хлебопекарной печи [125].

В целях эффективного использования и компактного размещения внутри кузова фургона разработанной печи предложено рассчитать геометрические параметры ее основных элементов: ширину ленты; пекарной камеры; источника инфракрасного излучения; вентилятора; хлебопекарных форм.

Ширина ленты при ограничениях длины помещения, является основным параметром, влияющим на производительность печи, ее ширина рассчитывается по зависимости

$$B_{\text{л}} = \sqrt{\frac{P_{\text{экп}}}{S_{\text{л}} \gamma_{\text{хф}} (0,57 t g(0,35 \Omega) + 0,28) K_z}}, \quad (2.30)$$

где  $B_{\text{л}}$  – ширина ленты, м;

$P_{\text{экп}}$  – производительность ЭК-печи, кг/час;

$S_{\text{л}}$  – скорость ленты, м/час;

$\gamma_{\text{хф}}$  – плотность хлебопекарных форм, кг/м<sup>3</sup>;

$\Omega$  – угол размещения хлебопекарных форм;

$K_z$  – коэффициент, учитывающий угол наклона ленты (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Значения коэффициента  $K_a$

| Угол наклона конвейера, $z$ | 0° – 10° | 10° – 15° | 15° – 20° | 20° – 25° |
|-----------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Коэффициент $K_z$           | 1,0      | 0,95      | 0,9       | 0,85      |

Параметры источника инфракрасного излучения рассчитываются с учетом длины площади облучения поверхности  $l_{\text{обл}}$  по формуле [110]

$$l_{\text{обл}} = A_0 / B, \quad (2.31)$$

где  $A_0$  – площадь облучаемой поверхности внутри пекарной камеры, м<sup>2</sup>,

$$A_0 = B v_{\text{тз}} \tau, \quad (2.32)$$

$v_{\text{тз}}$  – скорость перемещения тестозаготовки под излучателями, м/с,

$$v = P_{\text{экп}}/pVd, \quad (2.33)$$

$d$  – толщина облучаемой тестозаготовки, м [125].

Из теории подобия тепловых систем Кирпичёва-Гухмана следует, что для физического моделирования реальных тепловых процессов в лабораторных условиях необходимо соблюдение равенства чисел Фурье ( $F_0$ ) и Косовича ( $K_0$ ), составленных из определяющих для данных систем величин.

Так, для одномерного температурного поля уравнение для двух подобных систем (корка и мякиш хлеба) с учетом фазового превращения может быть представлено в следующем виде:

для первой системы (корка):

$$dt_1/d\tau_1 = a_1(d_2 t_1/dx_2^1) + (r_1/c_1) \times (du_1/d\tau_1); \quad (2.34)$$

для второй системы (мякиш):

$$dt_2/d\tau_2 = a_2(d_2 t_2/dx_2^2) + (R_2/c_2) \times (du_2/d\tau_2), \quad (2.35)$$

где  $t_2$  – температура парогазовой среды, °C;  $\tau$  – продолжительность выпечки, с;  $R$  – теплота парообразования, кДж/кг;  $c$  – удельная теплоемкость, кДж/(кг·K);  $a$  – коэффициент температуропроводности, м/с;  $x$  – ордината полуограниченного тела, в направлении которой изменяется температура, м; при делении почленно этих уравнений одно на другое:

$$(dt_1/d\tau_1)/(dt_2/d\tau_2) = (a_1/a_2)(d_2 t_1/dx_2^1)/(d_2 t_2/dx_2^2) + \\ + (R_1/c_1)/(R_2/c_2)(du_1/d\tau_1)/(du_2/d\tau_2), \quad (2.36)$$

заменив отношения определяющих величин через константы подобия, получим:

$$t_2/t_1 = Ct; \tau_2/\tau_1 = C\tau; a_2/a_1 = Ca; x_2/x_1 = C_1; R_2/R_1 = CR; \\ c_2/c_1 = Cc; u_2/u_1 = Cu. \quad (2.37)$$

Из этих выражений следует зависимость

$$C_t/C_\tau = C_a(C_t/C_1^2) + (C_r/C_c) (C_u/C_\tau), \quad (2.38)$$

отсюда

$$1 = C_a \cdot C_r/C_1^2 + (C_r/C_c) (C_u/C_t). \quad (2.39)$$

Подставив в последнее уравнение вместо констант подобия их значения, получим:

$$\begin{aligned} C_a C_\tau / C_1^2 &= (a_2 \tau_2 / 1_2^2) / (a_1 \tau_1 / 1_1^2) = idem; \\ C_r C_u / C_c C_t &= (r_2 u_2 / C_2 t_2) / (r_1 u_1 / c_1 t_1) = idem. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Из последнего выражения видно, что в нашем случае числа Фурье и Косовича будут иметь следующий вид:

$$F_0 = a\tau/1^2 \text{ и } K_0 = ru/c(t_2 - t_1) = q/c(t_2 - t_2). \quad (2.41)$$

На основании вышеизложенных положений теории подобия и конструктивных особенностей нового теплового оборудования с устройством инфракрасного и ультрафиолетового излучателей была изготовлена модель лабораторной установки, с помощью которой производились необходимые исследования.

На данном этапе исследования технологических систем производства бескоркового хлеба необходимо описать математическую модель основных показателей качества изделий с учетом воздействия на них инфракрасного и ультрафиолетового излучений.

В теории подобия различают управляемые (искомые) и управляющие (заданные) критерии. Управляющие критерии подобия должны содержать величины, известные из условий опыта, и отражать в обобщенном виде основные факты, вызывающие изменение качественных параметров теста-мякиша хлеба.

Обобщение немногочисленных экспериментальных данных различных авторов в области сушки сухарей, макарон и результатов предварительных экспериментов позволило предположить, что основные показатели качества хлеба являются функцией ряда управляющих параметров:

$$P_{\text{хл}} = f(m_{\text{в}} m_{\text{м}} \Pi_{\text{м}} \Pi_{\text{д}} m_{\text{д}} G_{\text{д}} T_{\text{ц}} \Delta\Psi\tau), \quad (2.42)$$

где  $P_{\text{хл}}$  –  $i$ -й показатель качества хлеба;

$m_{\text{в}}$  – массовая доля влаги;

$m_{\text{м}}$  – количество муки;

$\Pi_{\text{м}}$  – качество муки;

$m_{\text{д}}$  – количество дрожжей;

$P_d$  – качество дрожжей (степень воздействия ИК-излучения на размножение и рост в период нагрева изделия);

$T_c$  – температура в центре тестозаготовки;

$\Delta\Psi$  – интенсивность обработки в инфракрасном поле (мощность ИК-поля стандартной частоты (22000 Гц), Дб).

Так как выражение (2.44) в основном отражает все наиболее важные и значимые управляющие параметры, его можно считать математической моделью показателей качества хлеба.

Показатели качества готовой продукции предлагается рассмотреть в виде взвешенной суммы всех единичных показателей (каждый показатель умножается на свой коэффициент значимости), то есть комплексно, коэффициент значимости отражает важность каждого показателя для общего качества готовой продукции. Например, некоторые единичные показатели выпеченного хлеба могут включать коричневый цвет, текстуру, мякиш, аромат и вкус. Каждый из этих показателей может иметь различный коэффициент важности в зависимости от их важности для общего опыта потребления хлеба. Таким образом, показатель с наибольшим коэффициентом будет играть более важную роль в общей оценке качества хлеба. Данная методика аналогична тем, что применяются для оценки показателей качества мяса, рыбы, овощей. Общими показателями являются внешний вид, структура, консистенция, вкус, сочетаемость ингредиентов и т.д., такие характеристики могут быть включены в общую оценку качества пищевой продукции. Столь комплексное описание позволяет учесть все аспекты качества продуктов питания и дать объективную оценку на основе взвешенной суммы всех показателей. При проведении экспериментальных исследований и оценки показателей качества бескоркового хлеба было принято решение модернизировать шкалу оценки и перейти от 5-балльной системы к 10-балльной, что позволило более точно переводить отдельные показатели качества в баллы комплексной характеристики: объемный выход на коэффициент 0,3; весовой выход – 0,1; пористость – 0,3; экспертная

оценка – 0,2; кислотность – 0,02. Например, если пористость хлеба имеет коэффициент значимости 0,3, а оценка пористости составит 4 балла, то соответствующие баллы для комплексного показателя качества будут равны  $4 \times 0,3 = 1,2$ . При формировании группы из 10 экспертов были учтены следующие критерии: профессиональные навыки и опыт работы в области продовольственной промышленности; знание особенностей приготовления пищи для функционального питания; независимость и объективность в оценке качества продуктов; способность работать в группе и прийти к консенсусу при принятии решений. Метод ранжирования является одним из способов экспертной оценки, который позволяет сравнить различные показатели и установить их относительное значение. Каждому показателю устанавливаются весовые коэффициенты, отражающие их значимость относительно других показателей: вкус – 5; консистенция – 2; запах – 1,5; внешний вид – 1,5. Установлено, что показатели с высокой оценкой весомей, чем с низшей и принято решение их не учитывать. Состав пищевой ценности, наличие меланоидобразований, влажность, показатели качества бескоркового хлеба определяли в специализированной аккредитованной лаборатории [51].

В качестве параметров управления использовались:

процесс ЭК-теплопередачи для перехода теста-хлеб (регулировка парогазовой среды и продолжительности движения полуфабриката по ленте), объемное напряжение, конвекция в пекарной камере (регулировка потока воздуха), время выпечки и технологические параметры (влияние и количество ингредиента в тесте, толщина полуфабриката и т. д.);

инфракрасное излучение – выбор диапазона (ближний, средний, дальний ИК), длина волны, частота (длина волны  $\lambda = 4-9$  мкм, проникающая способность  $I_{\text{пс}}=4-5$  мм), приложение А.

Изменение объемного напряжения можно описать следующими соотношениями:

1) отношение напряжения к расстоянию между электродами: чем больше расстояние между электродами, тем ниже будет объемное

напряжение. Это объясняется тем, что при большем расстоянии между электродами электрическое поле будет менее интенсивным;

2) соотношение напряжения к объему хлеба: чем больше объем выпекаемой частицы теста (в данном случае – объем хлеба), тем выше будет объемное напряжение. Это связано с тем, что больший объем теста требует большего напряжения для осуществления одинакового воздействия на весь объем;

3) соотношение напряжения к массе теста: чем больше масса теста, тем выше будет объемное напряжение. Это объясняется тем, что больший объем теста требует большего напряжения для достижения одинаковой энергии воздействия;

4) соотношение напряжения к мучной массе на порцию теста: чем больше мучной массы используется на одну порцию теста, тем выше будет объемное напряжение. Это связано с тем, что большее количество муки приводит к большему объему выпекаемой частицы, требующему более высокого напряжения для одинакового воздействия на весь объем [51].

Исходя из результатов предыдущих испытаний и зависимости комплексного показателя качества от факторов, была обнаружена наиболее тесная связь между комплексным показателем качества и параметром, характеризующим связь напряжения между электродами. Коэффициенты корреляции в этом диапазоне изменения комплексного показателя качества колебались между 7 и 9 баллами. Эти результаты позволяют сделать вывод о значимости данного параметра при оценке показателя качества [107].

Был разработан и реализован план трехфакторного эксперимента на основе параметрической схемы в целях выявления влияния следующих факторов на комплексный показатель качества, органолептические свойства и объемный выход хлеба: объемное напряжение (отношение напряжения к расстоянию между электродами), массовая доля влаги в тесте и степень разрежения пекарной камеры. Результаты этого эксперимента позволят составить полную картину взаимосвязи между факторами и наблюдаемыми

показателями качества, органолептическими свойствами и объемным выходом хлеба. Что в свою очередь позволит оптимизировать процесс производства хлеба для более точной оценки и прогнозирования качества и свойств готового продукта.

Анализируя экспериментальные данные, были построены плоскости равного выхода, которые позволили определить оптимальные значения факторов для достижения высокого качества хлеба. Оптимальными значениями объемного напряжения являются 4,86–5,07 В/мм. Это указывает на важность оптимальной передачи энергии внутрь теста для достижения желаемого качества хлеба. Степень разрежения пекарной камеры также имеет важное значение для качества хлеба. Оптимальные значения этого параметра составляют 32 – 40 кПа. Это позволяет достичь желаемой структуры и текстуры хлеба. Массовая доля влаги в тесте является еще одним фактором, важным для качества хлеба. Оптимальное значение этого параметра находится в диапазоне 53 – 55 %. Оно обеспечивает необходимую влажность и упругость хлебной массы. С учетом этих оптимальных значений факторов можно достичь объемного выхода бескоркового хлеба ЭК-выпечки, составляющего не менее 53 %, экспертной оценки не менее 0,32, а комплексного показателя качества (по 10-балльной системе) не менее 8,5 баллов [115].

Теоретические и практические представления о процессе перехода теста-хлеб и результаты исследования его кинетики играют важную роль в разработке параметрической схемы процесса ЭК-выпечки для системы автоматизированного управления этим процессом. Эти исследования позволяют определить оптимальные значения управляющих параметров, которые способствуют производству высококачественного продукта. Основные цели и задачи исследований заключаются в научном обосновании и экспериментальной проверке предложенного образца технологического оборудования и технологии для продовольственной службы и включают в себя анализ особенностей процесса, формализацию задач, а также

определение ключевых этапов проведения экспериментальных исследований. Формализация задач может включать определение основных входных и выходных параметров, постановку целевых функций, разработку математических моделей, определение критериев качества и других важных показателей. Основные этапы проведения экспериментальных исследований включают разработку плана эксперимента, сбор и анализ данных, проверку и интерпретацию результатов. Это позволяет оценить влияние различных факторов на процесс и получить высококачественный продукт.

### Выводы по главе

1. Исследованы возможности корректировки рецептуры обогащенного хлеба для полноценного питания позволившие рекомендовать в качестве базовых следующие соотношения пищевых веществ:

- ограничение по белкам:

$$7,1x_1 + 10,9x_2 + 10,8x_3 \geq 45,$$

$$7,1x_1 + 10,9x_2 + 10,8x_3 \leq 55.$$

- ограничение по жирам:

$$8,3x_1 + 15,6x_2 + 8,8x_3 \geq 30,$$

$$8,3x_1 + 15,6x_2 + 8,8x_3 \leq 60.$$

- ограничения по углеводам:

$$17,1x_1 + 20,3x_2 + 5,4x_3 \geq 70,$$

$$17,1x_1 + 20,3x_2 + 5,4x_3 \leq 100.$$

2. Осуществлено моделирование рамной мешалки для приготовления белково-жировых эмульсий с режимами применением электромагнитных эффектов выявившие необходимость изменения параметров электропитания таким образом, чтобы предварительная обработка УЗ (уровня звукового давление – 140 дБ при частоте  $22 \pm 1,65$  кГц), генерируемых магнитострикторами (скорость вращаться  $8,3$ - $13,3$  с<sup>-1</sup>) осуществлялась при перемешивании и нагреве в течение 6-16 минут.

3. Выполнено моделирование пекарной камеры с применением электромагнитных эффектов возбуждающих ИК-нагрев для электроконтактной выпечки хлеба в поле инфракрасного излучения (длина волны  $\lambda = 4-9$  мкм, проникающая способность  $I_{\text{пс}}=4-5$  мм) время выпечки 7,2 минуты), при принудительной конвекции (тепловой поток  $Q = 2,4$  Вт).

### **ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОБОГАЩЕННОГО ХЛЕБА В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ**

#### **3.1 Обоснование целей и задач экспериментальных исследований.**

##### **Планирование натурного и вычислительного экспериментов**

Планирование экспериментальных исследований технических и технологических разработок в целях их научного обоснования и пригодности для практического применения заключалось в выборе числа и условий проведения испытаний, предложенных во 2-ой главе (о технологическом оборудовании и технологии производства хлеба) [7].

Основной целью экспериментальных исследований было сравнение расчетных значений показателей эффективности технологического оборудования и технологий производства хлебобулочных изделий с экспериментальными данными по результатам испытаний образцов предлагаемого технологического оборудования.

Особенности, рассмотренные в предыдущих разделах, были учтены при планировании экспериментальных исследований и построении матриц планирования эксперимента для отработки технологического оборудования и технологий производства хлеба.

Экспериментальные испытания процессов бескорковой выпечки планировались и проводились на основе теории подобия, позволяющей определить условия подобия явлений и процессов, и на этой основе упростить единичную экспериментальную проверку, а также распространить результаты этих исследований на другие подобные процессы и явления, происходящие в технологических устройствах в пищевых образцах, недоступных для полноценной экспериментальной проверки.

Если две системы качественно тождественны, то необходимы соотношения одинаковых величин, характеризующих их физическое подобие и в одних и тех же точках и в одно и то же время, геометрическое подобие, постоянные числа (постоянство подобия), подобие скоростей, плотности, температуры и внешних воздействующих факторов.

На основании третьей теоремы подобия Кирпичёва-Гухмана установлены следующие требования, выполнение которых необходимо, чтобы модель была подобна натурному образцу:

геометрическое подобие модели и натурального образца;

физические константы, характеризующие исследуемое явление, должны изменяться во всем объеме модели по тому же закону, что и в натурном образце;

величины, входящие в краевые условия модели и натурального образца, должны быть пропорциональными;

константы подобия, входящие в условия однозначности изучаемых явлений, должны выбираться в одном сходственном месте так, чтобы определяющие критерии имели сопоставимые числовые значения.

Техническими решениями для производства бескоркового хлеба является конвейерная хлебопекарная печь.

Конструкции рамной мешалки и конвейерной хлебопекарной печи были рассмотрены в параграфе 2.2 и 2.3.

Параметром оптимизации функционирования конвейерной хлебопекарной печи является продолжительность тепловой обработки,  $\tau$ , мин.

Продолжительность тепловой обработки  $\tau$ , мин зависит от следующих факторов: сила тока  $I$ , А, температура  $t$ , °С и влажность  $W$ , %. Уровни и интервалы варьирования этих факторов представлены в таблице 3.1.

Порядок проведения, план эксперимента и результаты опытов показаны в таблицах 3.2.

Таблица 3.1 – Уровни и интервалы варьирования факторов экспериментальных исследований основных характеристик продолжительности тепловой обработки

| Факторы               | Сила тока, А, $x_1$ | Температура, °С, $x_2$ | Влажность, %, $x_3$ |
|-----------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| Основной уровень      | 5                   | 32                     | 48                  |
| Интервал варьирования | 1,5                 | 2                      | 8                   |
| Нижний уровень        | 3,5                 | 26                     | 40                  |
| Верхний уровень       | 6,5                 | 36                     | 56                  |

Таблица 3.2 – Порядок проведения, план эксперимента и результаты испытаний продолжительности тепловой обработки

| №<br>опыт<br>а | Матрица<br>планировани<br>я |                |                | Продолжительность тепловой обработки |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |            |           | у <sub>ср</sub> | S <sub>j</sub> <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------------|----------------|----------------|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------|-----------|-----------------|-----------------------------|
|                |                             |                |                | отклики                              |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |            |           |                 |                             |
|                | x <sub>1</sub>              | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | y <sub>1</sub>                       | y <sub>2</sub> | y <sub>3</sub> | y <sub>4</sub> | y <sub>5</sub> | y <sub>6</sub> | y <sub>7</sub> | y <sub>8</sub> | y <sub>9</sub> | y <sub>10</sub> |            |           |                 |                             |
| 1              | -                           | -              | -              | 20,<br>2                             | 20,<br>3       | 20,<br>2       | 20,<br>3       | 20,<br>3       | 20,<br>6       | 20,<br>8       | 20,3           | 20,<br>6       | 20,<br>8        | 20,44      | 0,5       |                 |                             |
| 2              | -                           | +              | +              | 20,<br>1                             | 20,<br>5       | 20,<br>1       | 20,<br>5       | 20,<br>9       | 21             | 20,<br>6       | 20,9           | 21             | 20,<br>6        | 20,62      | 1,0       |                 |                             |
| 3              | -                           | +              | -              | 19,<br>8                             | 20,<br>1       | 19,<br>8       | 20,<br>1       | 20,<br>3       | 19,<br>6       | 20             | 20,1           | 20,<br>1       | 19,<br>7        | 19,96      | 0,4       |                 |                             |
| 4              | -                           | -              | +              | 19,<br>9                             | 20,<br>1       | 19,<br>9       | 20,<br>1       | 20,<br>2       | 19,<br>8       | 20,<br>4       | 20,2           | 19,<br>8       | 20,<br>4        | 20,08      | 0,4<br>5  |                 |                             |
| 5              | +                           | -              | -              | 20,<br>4                             | 20,<br>5       | 20,<br>4       | 20,<br>5       | 20,<br>6       | 20,<br>5       | 20,<br>6       | 20,6           | 20,<br>5       | 20,<br>6        | 20,52      | 0,0<br>5  |                 |                             |
| 6              | +                           | +              | +              | 19                                   | 19,<br>2       | 19             | 19,<br>2       | 19             | 18,<br>5       | 19,<br>1       | 19             | 18,<br>5       | 19,<br>1        | 18,96      | 0,5<br>8  |                 |                             |
| 7              | +                           | +              | -              | 18,<br>3                             | 18,<br>5       | 18,<br>3       | 18,<br>5       | 18,<br>8       | 17,<br>9       | 17,<br>8       | 18,1<br>3      | 17,<br>9       | 18,<br>1        | 18,22<br>3 | 0,9       |                 |                             |
| 8              | +                           | -              | +              | 18,<br>5                             | 19             | 18,<br>5       | 19             | 18,<br>6       | 18,<br>5       | 18,<br>6       | 18,6           | 18,<br>5       | 18,<br>6        | 18,64      | 0,3<br>4  |                 |                             |
| Сумма          |                             |                |                |                                      |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |            | 4,3<br>14 |                 |                             |

Однородность результатов испытаний конвейерной хлебопекарной печи определялась по критерию Кохрена [7, 36].

Дисперсия результатов каждого испытания (опыта) ( $S_j^2$ ) вычислялась по зависимости

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m (y_{ju} - y_j)^2, j = 1, 2, \dots, N, m = 2. \quad (3.1)$$

Расчет суммы дисперсии опытов  $\sum S_j$  выполнялся по формуле

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 + S_5^2 + S_6^2 + S_7^2 + S_8^2 = \sum_{j=1}^8 S_j^2 = 16,57. \quad (3.2)$$

Значение коэффициента Кохрена определялось по зависимостям:

$$\text{продолжительность тепловой обработки } G = \frac{S_{\max}^2}{\sum S_j^2} = \frac{2,6}{16,572} = 0,16. \quad (3.3)$$

Для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  табличное значение  $G$  критерия составляет  $G_{\text{кр}} = 0,679$  [36].

Тестовое значение критерия, рассчитанное по соотношению (3.3), меньше этого значения. В результате предположение об однородности изменения времени термообработки подтвердилось. Это позволяет нам продолжить разработку математической модели работы конвейерной печи.

Для учета нелинейности влияния факторов на продолжительность термообработки в конвекционной печи в план эксперимента включены векторы-столбцы взаимодействия между факторами (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Расчет коэффициентов уравнения регрессии

| № опыта | $x_0$ | Матрица планирования |       |       | Векторы-столбцы взаимодействия |          |          | Отклики |
|---------|-------|----------------------|-------|-------|--------------------------------|----------|----------|---------|
|         |       | $x_1$                | $x_2$ | $x_3$ | $x_1x_2$                       | $x_1x_3$ | $x_2x_3$ |         |
| 1       | +     | -                    | -     | -     | +                              | +        | +        | 44,05   |
| 2       | +     | -                    | +     | +     | -                              | -        | +        | 45,16   |
| 3       | +     | -                    | +     | -     | -                              | +        | -        | 47,66   |
| 4       | +     | -                    | -     | +     | +                              | -        | -        | 48,53   |
| 5       | +     | +                    | -     | -     | -                              | -        | +        | 50,86   |
| 6       | +     | +                    | +     | +     | +                              | +        | +        | 53,57   |
| 7       | +     | +                    | +     | -     | +                              | -        | -        | 52,46   |
| 8       | +     | +                    | -     | +     | -                              | +        | -        | 53,82   |

Расчет коэффициентов уравнения регрессии выполнялся по зависимости

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i, j = 0, 1, \dots, \quad (3.4)$$

$$b_0 = (44,05 + 45,16 + 47,66 + 48,53 + 50,86 + 53,57 + 52,46 + 53,82) : 8 = 49,42.$$

Результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии показаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Коэффициенты уравнения регрессии

| Параметр оптимизации                 | $b_0$  | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_{12}$ | $b_{13}$ | $b_{23}$ |
|--------------------------------------|--------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| Продолжительность тепловой обработки | 39,435 | 3,135 | 0,233 | 0,852 | 0,218    | 0,302    | -1,150   |

Анализ литературных данных [1-10, 12, 77, 134, 142] позволяет предположить зависимость продолжительности контактной выпечки хлеба  $\tau$  сек, от варьируемых в технологическом процессе параметров:

- $x_1$ - силы тока в цепи, А;
- $x_2$  – температуры в камере, °С;
- $x_3$  – влажность теста, %.

Принимая во внимание опыт, использования такого рода устройств, в качестве интервалов варьирования переменных при проведении и обработке эксперимента для выявления эффективности работы выпечной камеры в зависимости от проявления электромагнитного эффекта можно выбрать следующие границы изменения варьируемых факторов:

$$3,5 \leq x_1 \leq 7,0; \quad 27 \leq x_2 \leq 35; \quad 48 \leq x_3 \leq 56.$$

Для детального исследования влияния указанных параметров на эксплуатационные характеристики электроконтактной печи для разработки рекомендаций по проектированию пекарной камеры целесообразно провести эксперимент, выбрав указанные выше интервалы в качестве интервалов варьирования изменяемых факторов [14].

Важнейшие выводы при этом можно получить, варьируя первые два параметра и выбирая образцы, соответствующие по влажности граничным значениям изменения влажности теста.

Для проведенного эксперимента использовалось тесто следующей рецептуры: мука пшеничная 1 сорта – 500 г.; соль – 7,5 г.; дрожжи инстантные – 2,5 г.; вода питьевая – 307 г.; скорлупа яйца куриного (измельченного) – 30 г.

Изменением количества питьевой воды вводимой в состав ингредиентов достигали необходимой консистенции теста для выпечки электроконтактным способом.

На первом этапе проведения эксперимента определяли зависимость продолжительности выпечки тестозаготовки в пекарной камере, принятой в качестве функций отклика, от варьируемых параметров ( $Y_1$  – при влажности 48 %;  $Y_2$  – при влажности 56 %), в виде

$$Y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2.$$

Полученные в результате эксперимента данные обработанные в программе Excel и представлены на рисунках 3.1 и 3.2.

Исходные данные планирования линейного эксперимента для модели зависимости продолжительности выпечки хлеба  $\tau$ , ( $m=0,8$ )

|                            |          |          |          |                                              |          |           |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------------------------|----------|-----------|
|                            | $x_1$    | $x_2$    | $y_1$    |                                              |          |           |
|                            | 6,5      | 27       | 20,62    |                                              |          |           |
|                            | 3,5      | 35       | 20,08    |                                              |          |           |
|                            | 7,0      | 34       | 18,96    |                                              |          |           |
|                            | 3,5      | 30       | 18,64    |                                              |          |           |
| <b>Предельные значения</b> |          |          |          |                                              |          |           |
| <b>Мин</b>                 | 3,5      | 85       |          | <b>Оценка достоверности <math>R^2</math></b> |          |           |
| <b>Макс</b>                | 6,5      | 109      |          | a                                            | 1-a      |           |
|                            |          |          |          | 0,018104                                     | 0,981896 |           |
| <b>Уравнение регрессии</b> |          |          |          | <b>Оценка достоверности <math>b_i</math></b> |          |           |
|                            | 0,001393 | 0,142404 | 18,72642 | 0,019814                                     | 0,273864 | 2,6060992 |
|                            | 0,070328 | 0,519983 | 7,185613 | 0,987388                                     | 0,829825 | 0,2332508 |
|                            | 0,071494 | 1,553593 | -        | 0,012612                                     | 0,170175 | 0,7667492 |
|                            | 0,038499 | 1        | -        |                                              |          |           |
|                            | 0,185848 | 2,413652 | -        |                                              |          |           |

$$y_1 = 18,726 + 0,142x_1 + 0,001x_2$$

Рисунок 3.1 – Результаты экспериментальных исследований продолжительности выпечки тестозаготовки  $W=48\%$

Анализ этих таблиц, свидетельствует о корректности набора варьируемых параметров и выбранных функций отклика ( $R^2 = 0.98$ ).

Исходные данные планирования линейного эксперимента  
для модели зависимости продолжительности выпечки хлеба  $\tau$ , ( $m=0,8$ )

|                                                      |          |          |          |                                              |          |           |
|------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------------------------------------------|----------|-----------|
|                                                      | $x_1$    | $x_2$    | $y_2$    |                                              |          |           |
|                                                      | 6,5      | 89       | 18,2     |                                              |          |           |
|                                                      | 3,5      | 109      | 19,96    |                                              |          |           |
|                                                      | 6,5      | 109      | 20,52    |                                              |          |           |
|                                                      | 3,5      | 85       | 20,44    |                                              |          |           |
| <b>Предельные значения</b>                           |          |          |          | <b>Оценка достоверности <math>R^2</math></b> |          |           |
| <b>Мин</b>                                           | 3,5      | 85       |          | a                                            | 1-a      |           |
| <b>Макс</b>                                          | 6,5      | 109      |          | 0,018104                                     | 0,981896 |           |
| <b>Уравнение регрессии</b>                           |          |          |          | <b>Оценка достоверности <math>b_i</math></b> |          |           |
|                                                      | 0,035738 | -0,30383 | 17,79683 | 0,534314                                     | -0,61437 | 2,6042097 |
|                                                      | 0,066885 | 0,494529 | 6,83387  | 0,687598                                     | -        | 0,2334052 |
|                                                      | 0,378379 | 1,477543 | -        | 0,312402                                     | -        | 0,7665948 |
|                                                      | 0,304348 | 1        | -        |                                              |          |           |
|                                                      | 1,328866 | 2,183134 | -        |                                              |          |           |
| <b><math>y_2=17,800 - 0,304x_1 + 0,036x_2</math></b> |          |          |          |                                              |          |           |

Рисунок 3.2 – Результаты экспериментальных исследований продолжительности выпечки тестозаготовки  $W=56\%$

Регрессионный анализ экспериментальных данных с помощью электронных таблиц Excel позволил построить общие уравнения регрессии выбранного типа для функций отклика в приведенном в таблицах виде

$$Y_1 = 18,726 + 0,142x_1 + 0,001x_2,$$

$$Y_2 = 17,800 - 0,304x_1 + 0,036x_2.$$

Регрессионные статистики приведены для коэффициентов при варьируемых параметрах обеих функций отклика на рисунках 3.1 и 3.2.

Судя по величине множественного коэффициента корреляции  $R$ , построенные уравнения регрессии, в целом достаточно хорошо описывают функции отклика [10].

Вместе с тем, дополнительный анализ литературных источников говорит о том, коэффициенты взаимной корреляции отдельных варьируемых параметров на целевые функции и тем более между самими варьируемыми параметрами занимают практически весь диапазон от 0 до 1. Это позволяет

предположить наличие нелинейной связи между функциями отклика и некоторыми из варьируемых параметров.

Выберем для такого анализа ротатабельное квадратичное планирование с величиной звездного плеча  $\sqrt{2}$  по одному фактору из каждой группы и построим модели функций отклика для  $Y_1$  и  $Y_2$ .

Достаточно высокая точность поддержания выбранных факторов на заданных уровнях, выявленная в ходе предварительных исследований, позволила для дублирования ограничиться тремя параллельными опытами среднее арифметическое которых приведено ниже в таблице 3.7

Зависимости  $Y_1$  и  $Y_2$  от варьируемых параметров в этом случае искали в виде

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2.$$

Рандомизировав последовательность опытов при помощи таблицы случайных чисел для устранения влияния случайных погрешностей, матрицы планирования эксперимента для одного из значений влажности (48 %) записывали на рисунке 3.3. [110].

Для получения статистически достоверной математической модели при анализе экспериментальных данных проверялась однородность дисперсий выборок функций отклика  $Y_1$  и  $Y_2$ . Для этой цели вычислялось значение критерия Фишера по формуле

$$F_p = \frac{\max\{S_{yi}^2\}}{\min\{S_{yi}^2\}}.$$

Для данных представленные 3.3 это значение оказалось равным 4,0, что меньше табличного значения, равного 9,28 для доверительной вероятности 95 %.

Такое соотношение между расчетным и табличным значениями критерия Фишера свидетельствует о воспроизводимости эксперимента, что дает возможность с помощью пакета прикладных программ *EXCEL* вычислить необходимые оценки коэффициентов уравнений регрессии [11]

$$y_1 = 19,724 + 0,972x_1 + 0,095x_2 + 0,009x_1^2 - 0,025x_1x_2;$$

$$y_2 = 186,767 - 22,059x_1 - 1,459x_2 + 0,057x_1^2 - 0,001x_2^2 - 0,207x_1x_2.$$

## Исходные данные планирования нелинейного эксперимента

| Варьир. параметры              |          |          |          |                 | Продолжительность, τ |
|--------------------------------|----------|----------|----------|-----------------|----------------------|
| $x_1$                          | $x_2$    | $x_1^2$  | $x_2^2$  | $x_1 \cdot x_2$ | $Y_1$                |
| 6,5                            | 26       | 42,25    | 7225     | 552,5           | 10,62                |
| 3,5                            | 35       | 12,25    | 12769    | 395,5           | 9,08                 |
| 7,0                            | 35       | 42,25    | 12769    | 734,5           | 5,96                 |
| 3,5                            | 27       | 12,25    | 7225     | 297,5           | 9,64                 |
| 7,1                            | 33       | 2        | 9801     | 702,9           | 6,81                 |
| 2,9                            | 33       | 2        | 9801     | 287,1           | 9,1                  |
| 5                              | 35       | 25       | 2        | 565             | 6,22                 |
| 5                              | 26       | 25       | 2        | 425             | 9,35                 |
| 5                              | 33       | 25       | 9801     | 495             | 8,42                 |
| 5                              | 33       | 25       | 9801     | 495             | 8,22                 |
| 5                              | 33       | 25       | 9801     | 495             | 8,53                 |
| Предельные значения            |          |          |          |                 |                      |
| 2,9                            | 85       | мин      |          |                 |                      |
| 7,1                            | 35       | макс     |          |                 |                      |
| Уравнение нелинейной регрессии |          |          |          |                 |                      |
| -0,025                         | -0,00025 | 0,008555 | 0,094727 | 0,971692        | 19,724435            |
| 0,100042                       | 0,000325 | 0,11323  | 0,516778 | 9,970482        | 51,27159             |
| 0,3845                         | 4,201773 | -        | -        | -               | -                    |
| 0,624694                       | 5        | -        | -        | -               | -                    |
| 55,14455                       | 88,27446 | -        | -        | -               | -                    |

Рисунок 3.3 – Планирование эксперимента для  $Y_1$  при влажности теста 48 %

Уравнения регрессии, построенные по этим формулам только в том случае соответствуют реальному процессу, когда каждый член их вносит вклад, значимо отличающийся от случайных колебаний функций отклика. Это условие выполняется, если абсолютная величина коэффициента больше его доверительного интервала, определяемого при помощи критерия Стьюдента со степенью свободы

$$f = M(k-1), \quad \text{т.к. } |a_i| > 2\Delta a,$$

$$\text{где } \Delta a = t_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot S_{aij}, \quad S_{ai} = \frac{S_y}{\sqrt{k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M S_y^2}{k(M-1)}}; \quad k - \text{число параллельных опытов.}$$

Вычисления интервалов достоверности коэффициентов регрессии позволяют оставить в уравнениях регрессии только значимые члены.

Последним шагом, предшествующим использованию полученных экспериментально соотношений, является проверка его адекватности. Эта проверка позволяет судить о том, не отброшены ли в процессе обработки результатов величины, существенные для достоверного воспроизведения полученной зависимостью реального процесса и правильно ли выбрана искомая математическая модель. Она заключается в вычислении расчетного значения критерия Фишера и его сравнении с табличным. Расчетное значение определяется соотношением:

$$F_p = \frac{\max\{s_{ad}^2, s_y^2\}}{\min\{s_{ad}^2, s_y^2\}}, \quad \text{при} \quad S_{ag} = \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - y_{pi})^2}{k(M-1)},$$

где  $y_{pi}$  – рассчитанное по уравнениям значение функций отклика  $y_1$  и  $y_2$ ;

$s_y^2$  – дисперсия среднего значения функции отклика;

$n$  – число коэффициентов в уравнении.

Пользуясь данными рисунка 3.3 и результатами произведенных ранее вычислений для расчетного критерия Фишера, находим  $F_p=4,22$ . Для доверительной вероятности 95% и соответствующих степеней свободы числителя и знаменателя табличное значение критерия Фишера оказалось равным 12,67.

Соотношение  $F_p < F$  свидетельствует о том, что выбранная на этом этапе нелинейная математическая модель адекватна реальной зависимости эксплуатационных характеристик рабочих органов очистительной машины от варьируемых в эксперименте факторов [109].

Графически построенные функции отклика могут быть представлены в виде (рисунок 3.4).

Анализ построенных графиков позволяет сделать выводы по оптимизации конструкций и режимов работы пекарной камеры электроконтактной хлебопекарной печи. Так, например, пересечение построенных графиков свидетельствует о том, что при определенных конструкциях камер и варьируемых режимах их работы, они способны

реализовать эффекты которые одинаково успешно могут использоваться при выпечке хлеба широкого начального диапазона влажностей. Это дает возможность использовать более широкий выбор обогатительных добавок для повышения пищевой ценности хлеба, используемого в питание населения в особых условиях. С точки зрения работы такого рода оборудования это позволяет существенно уменьшать сам парк используемых при производстве хлеба пекарных камер и минимизировать количество производственных площадей для производства хлеба в особых условиях.

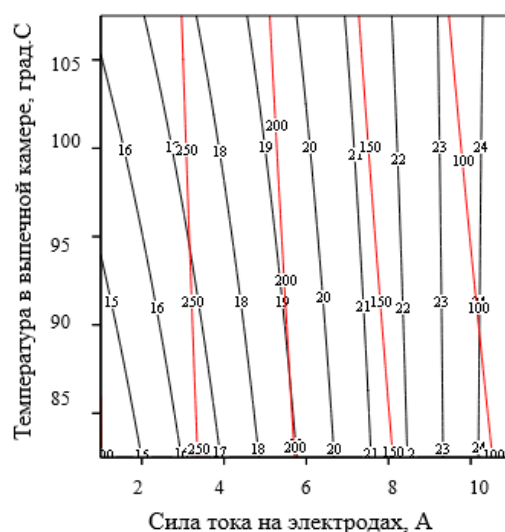


Рисунок 3.4 – Характер изменения продолжительности электроконтактной выпечки для различных функций отклика:

$U_1$ (влажность теста 48 %) – черные линии;

$U_2$ (влажность теста 56 %) – красные линии

### 3.2 Результаты экспериментальных исследований работоспособности модернизированного аппаратного обеспечения электромагнитного действия производства обогащенного хлеба в особых условиях

Экспериментальные исследования [127] с использованием экспериментальной конвейерной хлебопекарной печи позволили получить следующие результаты:

1). Подтверждена степень соответствия предложенных образцов технологического оборудования предъявляемым требованиям к технологическому оборудованию функционального питания

(производительность, энергопотребление, продолжительность приготовления, пищевая ценность продуктов питания и другие).

На основе расчета коэффициентов уравнений множественной регрессии проранжированы факторы, влияющие на эксплуатационные показатели работы образцов технологического оборудования, и технологии производства хлеба, приготовления мяса, рыбы и овощей с заданными показателями качества.

2). Рассчитаны основные конструктивные элементы конвейерной хлебопекарной печи (таблица 3.5), обеспечивающие производительность хлеба из муки пшеничной 1 сорта до 400 кг в сутки [127].

Таблица 3.5 – Конструктивно-эксплуатационные характеристики основных конструктивных элементов конвейерной хлебопекарной печи

| Наименование       | Габаритные размеры (мм×мм) | Энергопотребление, кВт/ч | Примечание                                                                   |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Конвейерная лента  | 4000×400                   | -                        | $V = 0,017$ м/с                                                              |
| Инфракрасная лампа | 300×150                    | 0,7                      | Длина волны $\lambda = 4-9$ мкм<br>проник. способн. $I_{\text{пс}} = 4-5$ мм |
| Двигатель          | 500×450                    | 6,6                      | 3000 обор., 88 % КПД                                                         |
| Вентилятор         | 200×150                    | 1,1                      | Тепловой поток $Q = 2,4$ Вт                                                  |
| Электроконтакты    | 3500×200                   | 2,5                      | сила тока $I = 5,7$ А                                                        |

На рисунке 3.5 показано влияние сорта муки и влажности тестозаготовки на показатели качества готовых изделий [127].

Экспериментально подтверждено влияние инфракрасного излучения на структуру (молекулярную и клеточную) теста-хлеба, что позволило вносить дополнительные добавки (бета-каротин, яичную скорлупу) в состав ингредиентов функционального хлеба. Особенности ИК-излучения: осуществлять нагрев клеток на глубине 1-3 см внутри полуфабриката, что позволяет разрушать структуру плесени и грибков, а также ускорять процесс перехода теста-хлеб. Следует отметить, что это также обеспечивает равномерность повышения температуры внутренних слоев, при этом снизив

упек. Также положительным фактором при выпечке хлеба в полевых условиях (таблицы 3.6 и 3.7) является обеззараживание верхних слоев тестозаготовок.

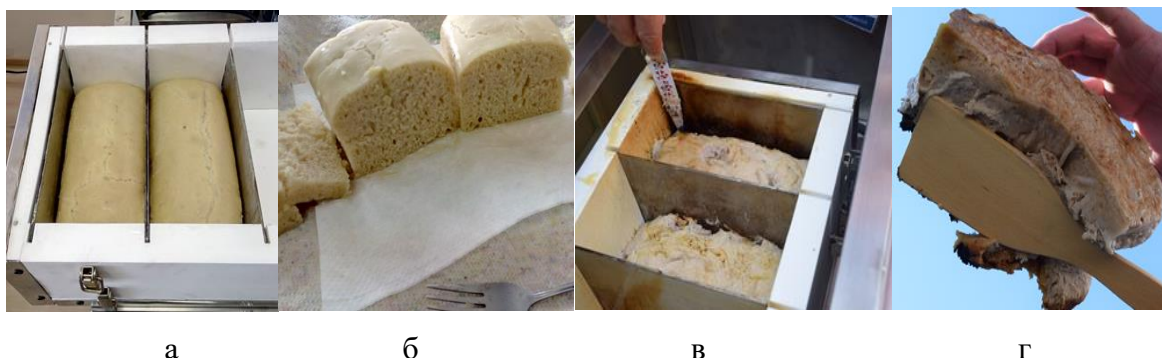


Рисунок 3.5 – Результаты экспериментальных исследований:

а – размещение тестозаготовок в экспериментальном образце; б – внешний вид хлеба с использованием синергии эффектов; в – результаты повышении продолжительности ЭК-выпечки; г – выпеченный хлеб из муки ржаной ( $W_{\text{теста}}=58\%$ )

Таблица 3.6 – Процессы, происходящие при повышении температуры

| Продолжительность выпечки, мин | Температура тестозаготовки, °C | Влияние теплоты на полуфабрикат                                            | Изменение показателей силы тока, А             |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1-1,5                          | 32-54                          | Повышение объема                                                           | Повышается                                     |
| 1,5-2,5                        | 55-78                          | Набухание белков и углеводов, снижение перемещения ионов                   | Уменьшается                                    |
| 2,5-3,5                        | 79-86                          | Снижение роста объёма                                                      | Повышается                                     |
| 3,5-5                          | 87-95                          | Способность белков к набуханию уменьшается                                 | Увеличивается                                  |
| 5-7                            | 95-99                          | Повышается испарение воды, объем готового изделия прекращает увеличиваться | Уменьшается из-за снижения влажности структуры |

Таблица 3.7 – Результаты электроконтактного энергоподвода при изменении напряжения ( $m_{\text{хлеба}} = 1 \text{ кг}$ )

| Показатели                     | Напряжение, В |         |         |
|--------------------------------|---------------|---------|---------|
|                                | 120           | 220     | 380     |
| Сила тока, А                   | 4,1–5,0       | 4,3–5,7 | 4,8–6,1 |
| Массовая доля влаги, %         | 51–55         | 52–54   | 54–56   |
| Продолжительность выпечки, мин | 8-9,2         | 5,5-7,1 | 6,1-7   |

При изучении усовершенствованной конструкции выпечной конвейерной хлебопекарной печи изучено совместное влияние ЭК-нагрева

и инфракрасного излучения на продолжительность выпечки хлеба ( $m = 0,7$  кг) подтверждено уменьшение общее количество получаемых меланоидиновых образований [114].

Результаты такого рода исследований для бескоркового хлеба представлены на рисунке 3.6.

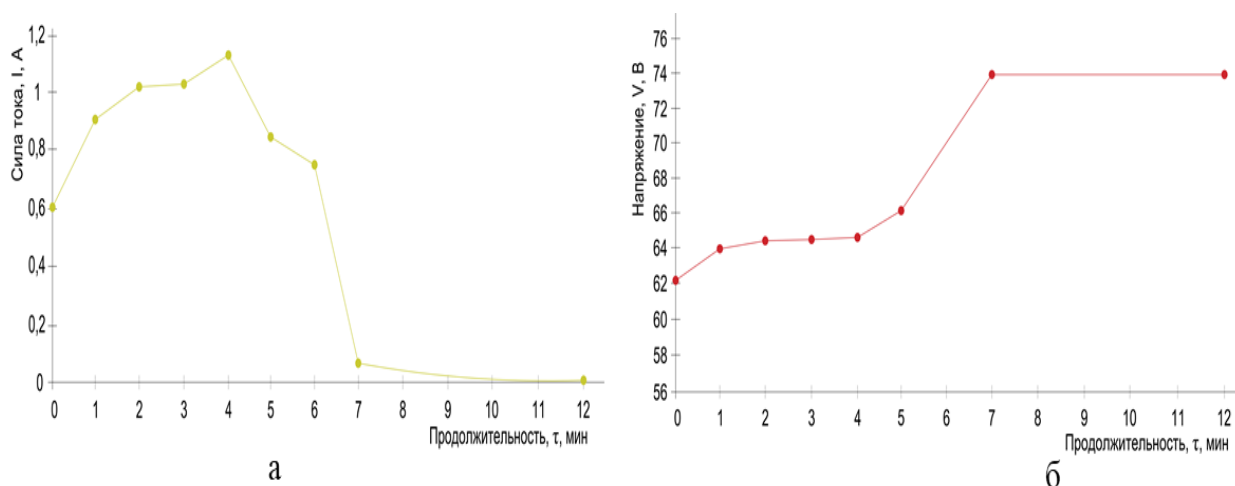


Рисунок 3.6 – Результаты исследования влияния изменений величин при выпечке бескоркового хлеба при комплексном воздействии полей:  
а – силы тока; б – напряжения

Органолептическая оценка качества выпекаемых хлебобулочных изделий проводилась группой экспертов включающей проектировщиков теплового оборудования, технологов хлебопекарного производства и представителей заказчиков от ООО «Проектинтертехника», ООО «Алгоритм» и ООО «Брасовские сыры» приложение Б.

В ходе анкетирования была сделана попытка выявления влияния основных органолептических показателей на качество хлебобулочных изделий, выпеченных на штатной конвейерной хлебопекарной печи с традиционной смесительной камерой для теста и с использованием новых разработок [127].

В качестве дескрипторов для такой оценки выбирали показатели (таблица 3.8), установленные для органолептического контроля Национальным стандартом Российской Федерации «Изделия хлебобулочные из пшеничной муки», введенным в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию от 29 декабря 2005 г. N 480-ст.

Таблица 3.8 – Дескрипторы по Национальному стандарту

| Название характеристики | Описание                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вкус и запах            | Свойственный изделию данного вида, без постороннего запаха. При использовании ароматических добавок – запах, свойственный внесенным добавкам                                                                                        |
| Поверхность             | Соответствующая виду изделия                                                                                                                                                                                                        |
| Цвет                    | От светло-желтого до темно-коричневого                                                                                                                                                                                              |
| Форма                   | Соответствующая виду изделия                                                                                                                                                                                                        |
| Пропеченность           | Пропеченный, не влажный на ощупь. Для рогаликовых изделий – мякиш слоистый в изломе, для слоеных изделий – с отделимыми друг от друга слоями; для изделий с начинкой – слой основы, соприкасающийся с начинкой, может быть увлажнен |
| Промес                  | Без следов непромеса.                                                                                                                                                                                                               |
| Пористость              | Соответствующая виду изделия                                                                                                                                                                                                        |

Конкордация группы экспертов оценивалась по критерию Кенделла.

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)},$$

где  $m$  – число экспертов в группе;

$n$  – число факторов;

$S$  – сумма квадратов разностей рангов (отклонений от среднего), вычисляемая по формуле

$$S = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m A_{ij} - \frac{1}{2} m(n+1) \right)^2.$$

Величина такого критерия оказалась равной 0,87 и свидетельствует о согласованности мнений экспертов [80,88,127].

Лепестковая диаграмма изменения органолептических показателей бескоркового хлеба, выпеченного на конвейерной хлебопекарной печи, представлена на рисунке 3.7.

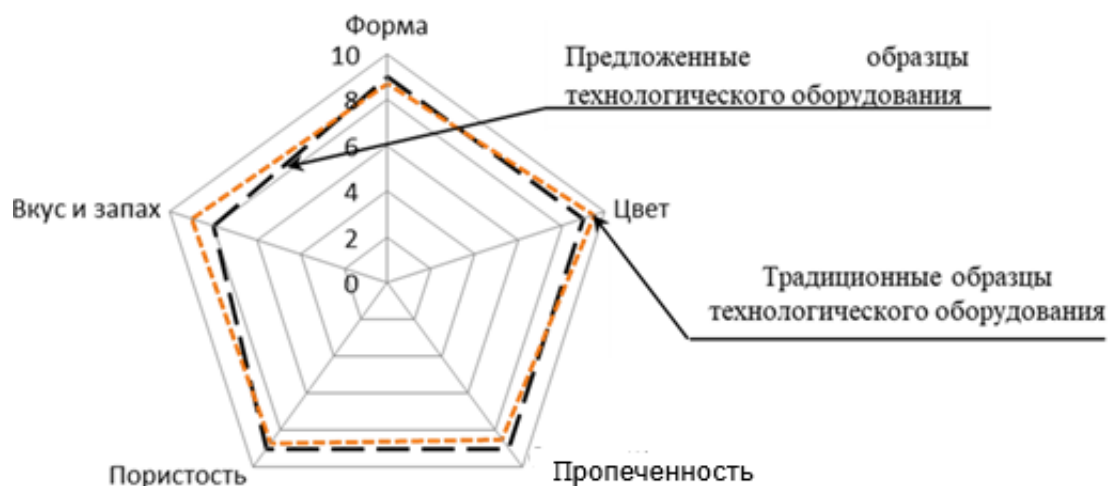


Рисунок 3.7 – Диаграмма органолептических показателей хлеба, выпеченного из тестозаготовки традиционными видами энергоподвода ИК-излучением и с помощью тепловых электронагревательных элементов

Изучено влияние комплексного воздействия полей на сохранность функциональных ингредиентов хлеба.

Электроконтактная выпечка в поле инфракрасного излучения обеспечивает сохранение нутриентов исходных компонентов за счет подачи теплоты и формирования теста во внутренних слоях полуфабриката. Инфракрасное излучение обеспечивает незначительное формирование верхней корочки, созревая «образ» традиционного изделия, а также снижение активности размножения грибков и плесени – стерилизует готовый продукт питания [127].

Конструктивные особенности предложенной хлебопекарной печи за счет комбинированного подвода теплоты (внутри пекарной камеры) при принудительной конвекции обеспечивают процесс выпечки хлеба для полноценного питания. При незначительной продолжительности выпечки хлеба  $\tau=6-8$  минут тесто успевает перейти в состояние мякиша. Тепловое поле, воздействующее на тесто щадяще влияет на функциональные ингредиенты, добавленные для повышения витамина А и кальция в готовом продукте питания.

Рассмотрев особенности производства хлеба в особых условиях с использованием предложенных образцов технологического оборудования (месильной камеры с рамной мешалкой, электроконтактной хлебопекарной печи), можно сделать вывод о том, что режимы их функционирования существенно отличаются от традиционных образцов. Предложенные в настоящей работе образцы аппаратов приготовления теста и выпечки хлеба имеют преимущества перед прототипами, выраженные в том, что конструктивные решения позволяют изготовить образец любого размера, с низким энергопотреблением, что является важным для особых условий производства [127].

Сравнительная оценка показателей качества бескоркового хлеба (выпеченного по предложенной технологии) показана на рисунках 3.8-3.10. Экспертная оценка и лабораторные исследования показали, что использование предложенного оборудования обеспечивает улучшение органолептических показателей готовых изделий за счет благоприятного воздействия на добавки, внесенные в состав полуфабриката и предотвращение процесса несанкционированного меланоидинообразования.

В случае анализа контрольных образцов в результате проведенных экспериментов для наиболее важных характеристик получили лепестковые диаграммы при различных режимах работы камер ЭК выпечки [127].

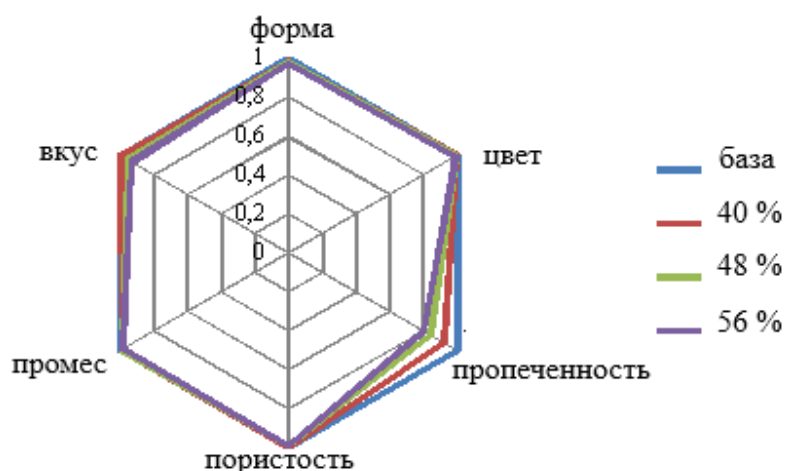


Рисунок 3.8 – Лепестковая диаграмма характеристик качества продуктов для производства (ЭК выпечки) полноценных хлебобулочных изделий при силе тока  $I=3,5$  А

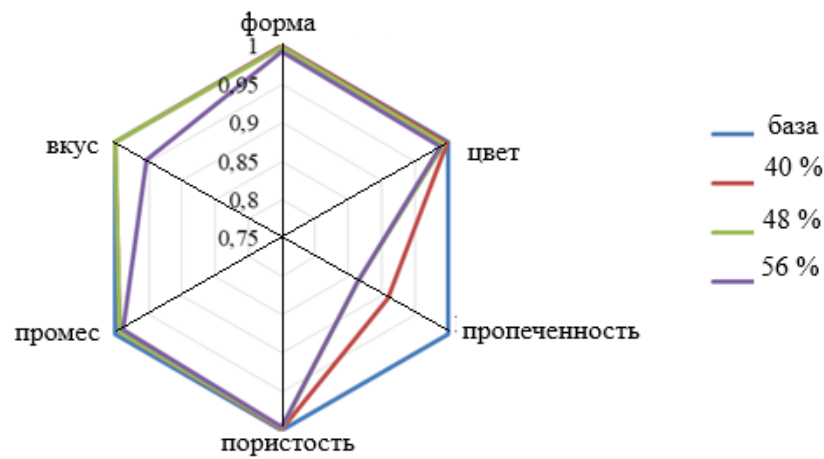


Рисунок 3.9 – Лепестковая диаграмма характеристик качества продуктов для производства (ЭК выпечки) полноценных хлебобулочных изделий  $I=5$  А

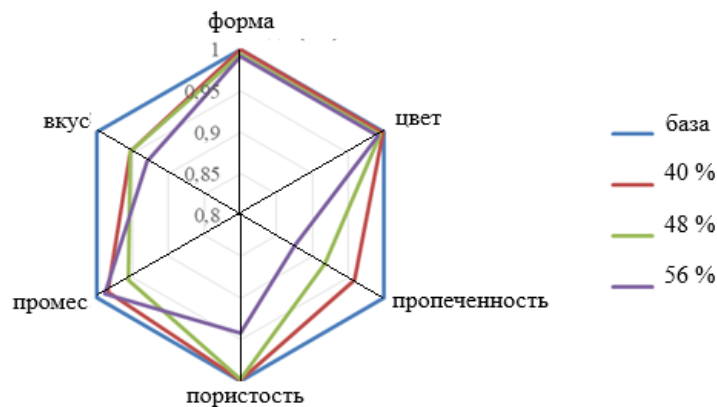


Рисунок 3.10 – Лепестковая диаграмма характеристик качества продуктов для производства (ЭК выпечки) полноценных хлебобулочных изделий  $I=6,5$  А

Для такой оценки может быть выбран некоторый обобщенный показатель качества связанный, например, с площадью соответствующего многоугольника лепестковой диаграммы [127]. Такой показатель можно легко определить, используя простую компьютерную программу, рисунок 3.11.

В приведенной программе количество оцениваемых параметров указывается как  $n$ , а их значения по мере срока хранения задаются в матричном виде в соответствующих столбцах. Параметр  $S$  характеризует отклонение комплексного показателя качества свежеприготовленного продукта от наилучшего достижимого принятым способом обработки, принятого за 1, а  $P_i$  – комплекс качества продукта с измененными режимами выпечки.

$$\begin{aligned}
 n &:= 6 & \varphi &:= 2 \frac{\pi}{n} & S &:= n \cdot \sin(\varphi) \\
 \text{ORIGIN} &:= 1 \\
 &\text{базовый образец} \\
 a &:= \begin{pmatrix} 0.985 \\ 0.997 \\ 0.92 \\ 0.999 \\ 0.994 \\ 1 \end{pmatrix} & b &:= \begin{pmatrix} 0.984 \\ 0.992 \\ 0.84 \\ 0.993 \\ 0.994 \\ 0.96 \end{pmatrix} & c &:= \begin{pmatrix} 0.974 \\ 0.99 \\ 0.8 \\ 0.991 \\ 0.989 \\ 0.93 \end{pmatrix} \\
 P1 &:= \sin(\varphi) \cdot (a_1 a_2 + a_2 a_3 + a_3 a_4 + a_4 a_5 + a_5 a_6 + a_6 a_1) \\
 P2 &:= \sin(\varphi) \cdot (b_1 b_2 + b_2 b_3 + b_3 b_4 + b_4 b_5 + b_5 b_6 + b_6 b_1) \\
 P3 &:= \sin(\varphi) \cdot (c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_3 c_4 + c_4 c_5 + c_5 c_6 + c_6 c_1) \\
 \Delta 1 &:= S - P1 & \Delta 2 &:= S - P2 & \Delta 3 &:= S - P3 \\
 \Delta 1 &= 0.182 & \Delta 2 &= 0.408 & \Delta 3 &= 0.499
 \end{aligned}$$

Рисунок 3.11 – Программа оценки эффективности ЭК-выпечки

Результаты экспериментальных исследований позволили сделать вывод, что возможности производства полноценного в пищевом отношении хлеба и хлебобулочных изделий за счет совершенствования процессов и аппаратов производства и использования комплексного воздействия полей, без снижения показателей качества полностью подтверждены [114].

### **3.3 Обоснование технических характеристик модернизированного аппаратурного обеспечения электромагнитного действия производства обогащенного хлеба в особых условиях**

При обеспечении выпечки бескоркового хлеба возникают проблемы с выбором перемешивающего устройства для осуществления подготовки белково-жировых композиций, входящих в его состав.

Смесители с фиксированной рамой представляют собой низкоскоростные смесители [1-4].

Их слабая сторона – трудности изготовления из-за высокой металлоемкости, недостаточной надежности и большой массы.

Рамный смеситель характеризуется лопастями, выполненными в виде изогнутой трубки, внешняя поверхность которой снабжена пластинами, прикрепленными к центру трубки и существенной перемычкой к круговым лопастям, а также к горизонтальной и вертикальной плоскостям [121].

Существенным недостатком является высокая металлоемкость из-за большого количества пластин, приваренных к лопастям и мосту.

Наиболее совершенным является рамочный смеситель, включающий в себя концентрическую пробку и лопасти в виде централизованно установленных трубок, представленных на рисунке 3.6. Такое конструктивное выполнение позволит обеспечить определенную эксплуатационную надежность мешалки, но не обеспечивает турбулизации среды вдоль лопастей. Решающим является повышение эксплуатационной надежности и обеспечение турбулизации среды не только вдоль лопастей, но внутри всего корпуса аппарата.

Такая конструкция обеспечивает перенос тепла и массы по всему устройству, что позволяет улучшить операции смешивания, обеспечивая при этом эксплуатационную надежность и снижая металлоемкость оборудования.

Как показали испытания, в предлагаемом техническом решении угол относительного поворота плоскостей между собой может регулироваться в зависимости от мощности подаваемых на электромагнитные катушки импульсов, что обеспечивает перемешивание композиций разных плотностей и вязкостей.

С использованием предложенной выше методики разработана конвейерная хлебопекарная печь на основе применения электроконтактного

прогрева выпекаемой тестозаготовки, инфракрасного излучения и принудительной конвекции.

Сущность технического решения заключается в использовании комплексного воздействия теплоты в процессе выпечки (электрического тока высокой частоты и инфракрасного излучения), обеспечивающего трение и колебание молекул внутренних слоев тестозаготовки, обработки внешнего слоя, в результате чего выделяется теплота и реализуется переход теста-хлеб при значительном снижении температуры парогазовой среды и упека готового изделия [121].

Общий вид конвейерной хлебопекарной печи представлен на рисунке 3.12.

Сущность заключается в использовании в процессе выпечки электрического тока высокой частоты, обеспечивающего трение и колебание молекул внутренних слоев тестозаготовки, в результате чего выделяется теплота и реализуется переход теста-хлеб при значительном снижении температуры парогазовой среды. Принцип работы конвейерной хлебопекарной печи представлен на рисунке 3.13.

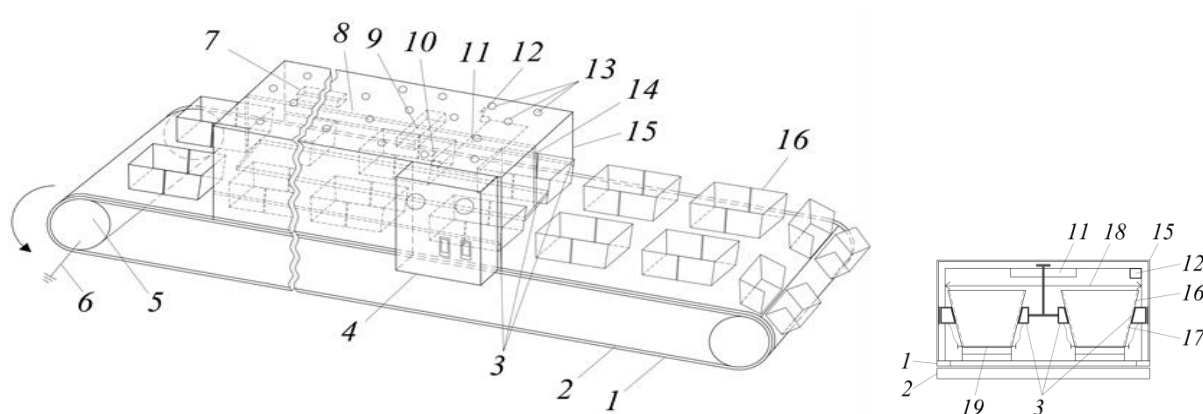


Рисунок 3.12 – Общий вид конвейерной хлебопекарной печи:

- 1 – лента; 2 – конвейер; 3 – электрод; 4 – блок управления; 5 – ведущий диск;  
 6 – заземление; 7 – ультрафиолетовая лампа; 8 – электрический провод;  
 9 – источник инфракрасного излучения; 10 – датчик температуры;  
 11 – вентилятор; 12 – датчик влажности; 13 – перфорация; 14 – штанга;  
 15 – корпус; 16 – хлебопекарная форма; 17 – токопроводящая пластина;  
 18 – пекарная камера; 19 – диэлектрическая пластина

Конструкция хлебопекарной конвейерной электроконтактной печи предусматривает включение в ее состав корпуса (15) (как вариант, из нержавеющей стали), внутри которой размещена пекарная камера (18) (как вариант, изготовленная из тефлона).

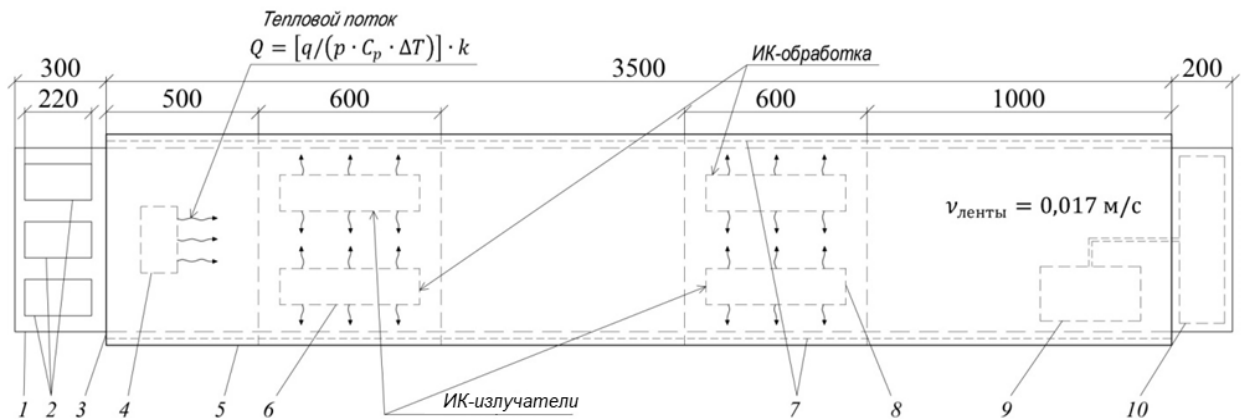


Рисунок 3.13 – Принцип работы конвейерной хлебопекарной печи:

- 1 – лента; 2 – хлебопекарная форма; 3 – конвейер; 4 – вентилятор;  
 5 – пекарная камера; 6 – источник инфракрасного излучения; 7 – электрод;  
 8 – ультрафиолетовая лампа; 9 – электродвигатель; 10 – ведущий диск

В крыше пекарной камеры (18) проделана перфорация (13) (как вариант, несколько, отверстия круглой формы). Диэлектрическая пластина (19) (как вариант, пищевой пластмасс, прямоугольной формы толщиной 3 мм, разделенный на две части) жестко зафиксирована (клеевым способом) на внешней стороне подушки (20) (как вариант, из диэлектрического материала, высотой 10 мм, с возможностью сгибаться). На внешней стороне дна хлебопекарной формы (16) (как вариант, прямоугольной формы, из алюминия) лазерной резкой проделан паз по длине токопроводящей пластины (17), жестко зафиксированной к внутренней стенке. Диэлектрическая пластина (19) обеспечивает электробезопасность и не позволяет соприкасаться влаге с металлическими частями печи. Подушка (20) неподвижно (болтовым соединением) зафиксирована на внешней стороне ленты (1).

Токопроводящая пластина (17) через электрод (3) (как вариант, по форме металлической щётки) связана с источником переменного электрического тока промышленной частоты. Электрод (3), жестко закрепленный на боковых стенках и штанге (14), зафиксированной по центру к потолку пекарной камеры (18) по всей длине.

Автоматизация процесса управления достигается за счет включения в комплект печи блока управления (4), обеспечивающего автоматическую регулировку подаваемого напряжения (120 В, 220 В), при силе тока до 6 А на токопроводящую пластину (17) (выполняющую роль электрода) и поддержание оптимального режима превращения теста-хлеб.

Блок управления (4) через шину имеет обратную связь с датчиком влажности (12), датчиком температуры (10), а также вентилятором (11), ультрафиолетовой лампой (7), источником инфракрасного излучения (9) (как дополнительного источника тепловой обработки тестозаготовок).

Хлебопекарная конвейерная электроконтактная печь работает следующим образом. Тесто влажностью  $W = 54\text{--}56\%$  после замеса (безопасный способ тестоведения) помещается в хлебопекарную форму (16), размещенную на ленте (1) перед пекарной камерой (18). Круговое движение ленты (1) по конвейеру (2) позволяет перемещение хлебопекарной формы (16) в пекарную камеру (18), что обеспечивает соприкосновение электрода (3) с токопроводящей пластиной (17). Скорость движения ленты (1) устанавливается на блоке управления (4) и зависит от массы тестозаготовки, ее влажности и количества соли. Включение в комплект печи дополнительных источников теплоты и вентилятора внутри пекарной камеры обеспечивает создание оптимальных (температура  $t = 31\text{--}33\text{ }^{\circ}\text{C}$ , влажность воздуха  $W = 79\text{--}84\%$ ) условий для выпечки бескоркового хлеба. Перфорация (13) по оси крышки корпуса (15) позволяет отводить пары, выделяющиеся из тестозаготовок. Выпеченный хлеб извлекается из хлебопекарной формы (16) самостоятельно, в момент перемещения ленты (1) через ведущий ролик (5).

Полезность технической разработки заключается в том, что, в отличие от существующих образцов, применение в процессе электроконтактной выпечки хлеба в хлебопекарной камере, изготовленной из фторопласта с широким диапазоном регулируемого напряжения выпечки, дает возможность использования ее для расстойки теста, выпечки бескоркового хлеба и производства сухарей с использованием математического моделирования [121].

Преимущества линии состоят в том, что, в отличие от существующего аналога, она обеспечивает интенсификацию производства бескоркового хлеба в 1,3–1,5 раза [121], снижение меланоидинообразования и неусвояемых организмом соединений, позволяет сохранить находящиеся в тесте витамины, а также позволяет производить хлеб функционального назначения за счет корректировки его состава минеральными веществами, а также пищевыми волокнами и тд.

### **Выводы по главе**

1. Сформулированы основные требования к методике планирования экспериментальных исследований, включающие построение нелинейных линейных регрессионных моделей.

$$Y_1 = 18,726 + 0,142x_1 + 0,001x_2,$$

$$Y_2 = 17,800 - 0,304x_1 + 0,036x_2.$$

2. Экспериментальное уточнение процесса применения магнитострикционного эффекта в смесителе при тестоприготовлении с построением ротатбельных моделей его рациональной работы привело к следующим уравнениям:

$$Y_1 = 19,724 + 0,972x_1 + 0,095x_2 + 0,009x_1^2 - 0,025x_1x_2$$

$$Y_2 = 186,767 - 22,059x_1 - 1,459x_2 + 0,057x_1^2 - 0,001x_2^2 - 0,207x_1x_2$$

3. Выявлены технологические параметры работы пекарной камеры при выпечке обогащенного бескоркового хлеба с применением электромагнитно-упругого эффекта обеспечиваемого биметаллической пластиной.

## **ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ХЛЕБА В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ**

### **4.1 Общие принципы оценки эффективности модернизированного аппаратурного обеспечения производства обогащенного хлеба в особых условиях**

Осознание необходимости экономить пищевое сырье при его переработке пришло уже в начале XVIII века. Знаменитый английский учёный Томас Мальтус выдвинул гипотезу, что продовольственные ресурсы увеличиваются по мере арифметического роста, а численность населения увеличивается в соответствии с геометрическими законами роста [123]. По его утверждениям, такое предположение неизбежно приводит к социальной катастрофе из-за появления крупных групп населения, не имеющих продовольственной безопасности. Подобные взгляды обосновывали теорию о необходимости эффективного использования всех ресурсов как одного из главных условий роста национального дохода и производства продукции материальной промышленности. В результате возникло стремление сэкономить ресурсы и снизить их нерациональное использование в производстве, особенно продуктов питания, сохранив их качество.

Ресурсоемкость продукции – термин, принятый для характеристики затрат материальных ресурсов для любой отрасли производства, в том числе и для производства продуктов питания [113].

Под ресурсоемкостью продукции понимают совокупность характеристик, описывающих совокупные затраты различных видов и назначений ресурсов, затраченных на ее создание и использование. При этом их можно охарактеризовать понятиями «ресурсопотребления» и «ресурсосбережения» [123].

Потребление ресурсов – это изменение определенных видов ресурсов при данных условиях работы технологического процесса или конкретного устройства.

Под ресурсосбережением понимают комплекс мероприятий, позволяющих снизить расход ресурсов при осуществлении определенной технологической операции или работе устройства в определенном состоянии.

Вводные понятия указывают на необходимость комплексной экономии материальных ресурсов на протяжении всего жизненного цикла любого процесса и оборудования: производства, переработки, транспортировки, потребления и утилизации отходов.

Необходимо ввести комплекс показателей ресурсосбережения для определения уровня некоторых понятий. Их обычно делят на две самостоятельные группы: производительность и эффективность [114].

Показатели производительности описывают адаптацию процессов и оборудования для достижения оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и восстановлении качественных характеристик продукции, объема производства и условий эксплуатации. С технической точки зрения показатели эффективности характеризуют технологическую рациональность процессов и долговечность конструктивных решений оборудования. С экономической точки зрения эти показатели описывают такие характеристики, как трудоемкость, материалоемкость и энергоемкость [127].

Показатели ресурсоэффективности описывают характеристики процессов и оборудования, определяющие ресурсоемкость бизнеса, то есть эффективность потребления ресурсов, необходимых для их непосредственного использования по назначению. К таким показателям относятся, например, удельные энергозатраты, время выполнения технологического процесса, количество отходов сырья и другие.

На рисунке 4.1 показаны некоторые способы экономии ресурсов на разных этапах.

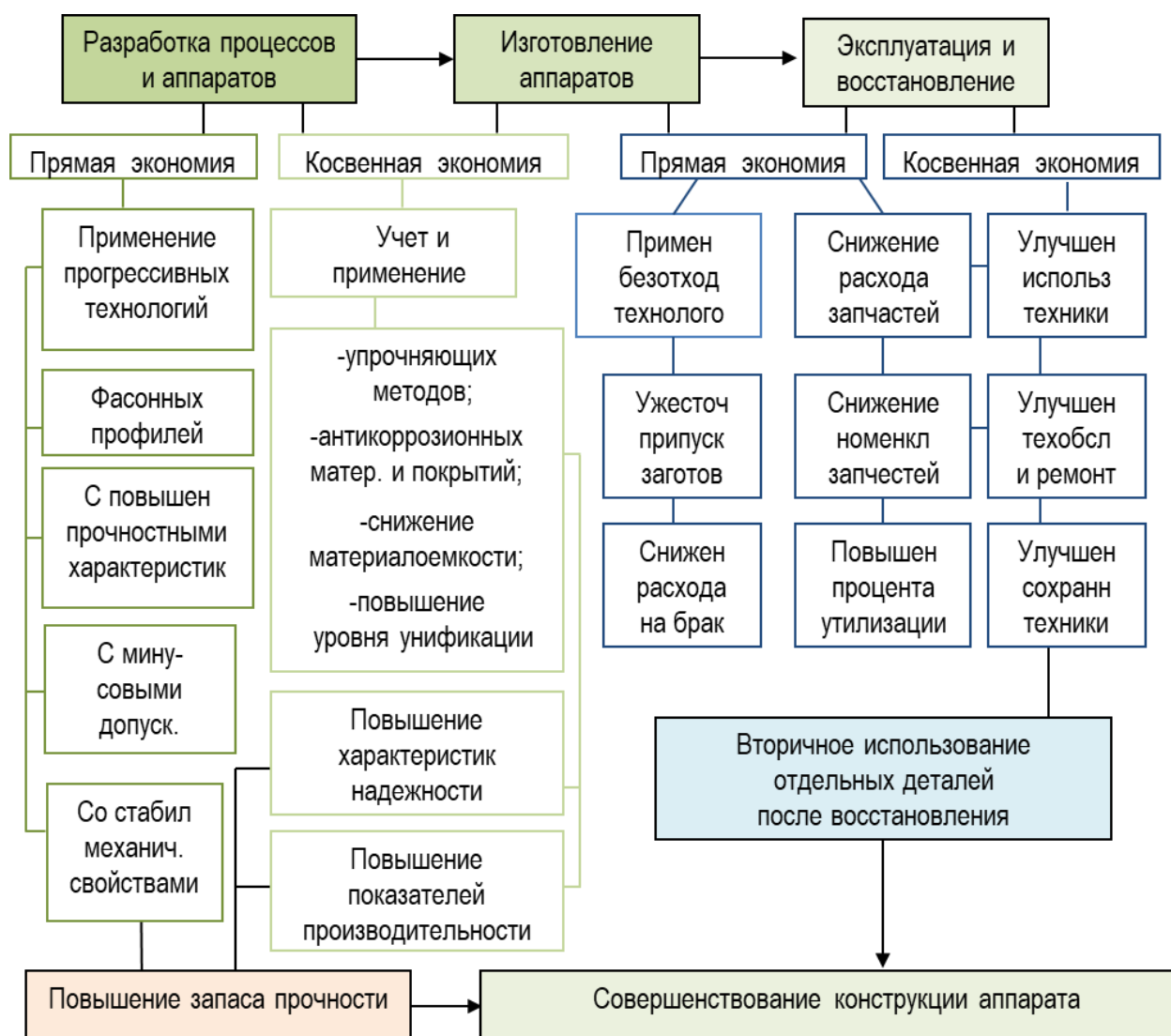


Рисунок 4.1 – Основные направления ресурсосбережения

Усилия по сохранению ресурсов наиболее эффективны, когда они затрагивают почти все аспекты прямой и косвенной экономии строительных материалов, энергии, сырья и затрат на рабочую силу.

На этапе проектирования устройств используются экономичные компоненты с улучшенными и стабильными характеристиками. Эффективность использования материалов оценивается показателем удельного веса в зависимости от полезного эффекта массы изделия или номинального значения основного параметра.

Важную роль в мероприятиях по ресурсосбережению на этом этапе играет косвенная экономия: повышение ресурсных характеристик изделия,

улучшение удельных характеристик машин за счет усовершенствований конструкции, а также улучшение показателей надежности [123].

Комплекс мероприятий по снижению ресурсоемкости оборудования при производстве и сборке, обычно ограничивающий номенклатуру комплектующих и запасных частей, конструктивные разработки, обеспечивающие возможность использования безотходных технологий.

Одним из основных способов удовлетворения требований, направленных на снижение затрат, связанных с эксплуатацией и обслуживанием оборудования, является технологическая рационализация изделия. Технологическая рациональность конструкции оборудования является динамической характеристикой, которая меняется в зависимости от способов эксплуатации и обслуживания. Такое направление совершенствования регулируется соответствующим подбором и установкой элементов состава и конструкции, узлов, процессов и оборудования и обеспечением их долговечности [8].

В целях снижения ресурсоемкости технической службы такие технические решения применяются в рабочем комплексе при подготовке оборудования к работе путем замены частей изделия на такие же детали, с сохранением заданного качества оборудования, и сокращение затрат в целом при восстановлении геометрических особенностей и качества поверхности деталей.

На этапе разработки, например, необходимо выполнить определенный комплекс задач, чтобы реализовать основные направления ресурсосбережения в оборудовании. Экономический эффект от этих работ показан на рисунке 4.2.

Функциональный анализ и анализ затрат обычно предшествуют разработке проекта в целях увеличения производительности. Задачи функционального стоимостного анализа направлены на снижение стоимости использования оборудования за счет снижения затрат всех ресурсов, необходимых для его надежной работы. Таким образом, анализ

функциональной стоимости направлен на снижение ресурсоемкости оборудования за счет улучшения эксплуатационной структуры [124].

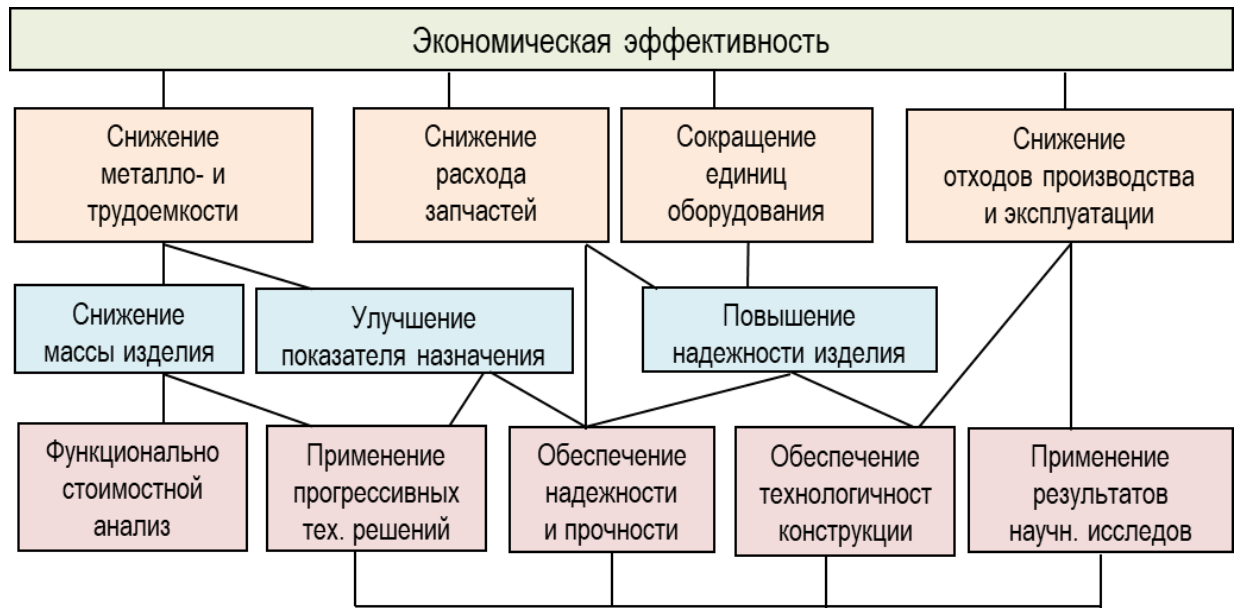


Рисунок 4.2 – Влияние работ стадии разработки оборудования на экономию ресурсов

Объектом анализа является совокупность функций оборудования в целях определения наиболее экономически выгодного варианта конструкции как в производстве, так и в эксплуатации [124].

При проведении функционального анализа стоимости пищевого оборудования можно руководствоваться следующими соображениями [124].

Используя результаты исследований, предположим, что определенное устройство в процессе переработки уменьшило количество отходов сырья с  $n_0$  до  $n_1$ . Представим, как использование этих результатов влияет на общую эффективность работы устройств.

Откорректируем объем перерабатываемого сырья с точки зрения получения «на выходе» одного и того же количества готового продукта  $A$ . Для этого можно записать:

$$A = a_0 (l - n_0) = a_1 (l - n_1), \quad (4.1)$$

отсюда следует, что новый объем переработки сырья определится как

$$a_1 = a_0 (l - n_0) / (l - n_1), \quad (4.2)$$

где  $a_0$  – первоначальный объем переработки сырья;

$n_0$  и  $n_1$  – доля отходов на базовом и усовершенствованном оборудовании соответствующим образом.

Пусть использование новшества привело к увеличению стоимости оборудования с  $C$  до  $C_1 = A_1 C$ .

С учетом этих изменений балансовая стоимость оборудования определится (с затратами на доставку и монтаж) соотношениями  $A_2 C$  и  $A_2 C_1$  для базового и усовершенствованного образцов оборудования, соответственно [124].

Сопутствующие капитальные вложения в этом случае определяются как

$$K_0 = A_3 A \text{ и } K_1 = A_3 C_1 = A_3 A_1 C. \quad (4.3)$$

В составе эксплуатационных затрат рассмотрим:

амортизационные отчисления;

затраты на текущий ремонт и техобслуживание;

стоимость электроэнергии;

стоимость спецодежды.

Амортизационные отчисления и отчисления на капремонт оборудования составят [124]:

$$A_{m0} = A_4 A_3 C; A_{m1} = A_4 A_3 C_1 = A_4 A_3 A_1 C; K_{p0} = A_5 A_2 C; \\ K_{p1} = A_5 A_2 C_1 = A_5 A_2 A_1 C. \quad (4.4)$$

Затраты на текущий ремонт и техобслуживание определяются величиной амортизационных отчислений и составят:

$$T_{p0} = A_6 A_{m0}; T_{p1} = A_6 A_{m1}. \quad (4.5)$$

Затраты на электроэнергию рассчитывают, исходя из потребляемой мощности, годового времени работы оборудования и стоимости электроэнергии, причем коэффициент загруженности оборудования определяется дневной нормой переработки сырья и производительностью оборудования.

Производительность нового оборудования можно определить из следующих соображений. Энергозатраты определяются количеством отделенных при переработке отходов, так как все они вступают в контакт с

рабочими органами. При одинаковой мощности используемых электродвигателей за единицу времени на базовом и новом образцах оборудования должно быть отделено одинаковое количество отходов, следовательно,  $P \cdot n_0 = P_1 \cdot n_1$ .

Таким образом, для энергозатрат получаем:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{30} &= A_7 (a_0 / P); \\ \mathcal{E}_{31} &= A_7 (a_1 / P_1) = A_7 (a_0 / P)(1 - n_0)n_1 / [(1 - n_1)n_0].\end{aligned}\quad (4.6)$$

Заработная плата рабочего, обслуживающего оборудование, с соответствующими начислениями также зависит от фактически отработанного времени, то есть объема переработки сырья и производительности машины:

$$\mathcal{E}_{\text{по}} = A_8 (a_0 / P); \quad \mathcal{E}_{\text{п1}} = A_8 (a_1 / P_1). \quad (4.7)$$

Аналогичным образом определяются затраты на спецодежду:

$$C_{oo} = A_9(a_0/P) ; C_{o1} = A_9(a_1/P_1). \quad (4.8)$$

Учет показателей надежности, в частности долговечности, произведем введением в анализ коэффициентов реновации, определяющихся, как известно, формулой

$$R = E / [(1 + E)T - 1], \quad (4.9)$$

где  $E$  – норматив приведения ( $E = 0,1$ );

$T$  – срок службы оборудования, лет.

Используя приведенные соотношения, известную формулу для оценки эффективности нового оборудования [124]

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cdot \frac{B_1(R_0 + E_H)}{B_2(R_1 + E_H)} + \frac{(I_1 - I_2) - E_H(K_2 - K_1)}{R_1 + E_H} - \mathcal{E}_1, \quad (4.10)$$

можно переписать, с учетом стоимости высвобожденного сырья, в виде

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= \frac{\left\{ C(1 - n_0) \left[ \frac{E \cdot A}{(1 + E)^T - 1 \cdot P} + E_H \right] - (A_7 + A_8 + A_9) \right\}}{(l - n_1)} + \\ &+ C(1 - A_1)(A_2 A_5 + A_3 A_4 + A_3 A_4 A_6 + A_3 E_H) + \frac{A(A_7 + A_8 + A_9)}{P(l - n_0)n_0} - \\ &- \left[ C A_1 - \frac{A_0(n_0 - n_1)}{(l - n_0)(l - n_1)} \right] \left[ \frac{E}{(1 + E)^{T m_K} - 1} \right].\end{aligned}\quad (4.11)$$

Окончательно, в расчете на суточную норму переработанного сырья, выражение для экономической эффективности запишем:

$$ЭК = Э / \left[ \frac{E}{(1+E)^{Tm_k-1}} + E_n \right], \quad (4.12)$$

где  $C$  – стоимость базового образца оборудования;  
 $A$  – объем переработанного сырья «на выходе»;  
 $P$  – производительность базового образца;  
 $T$  – срок службы базового образца;  
 $m_k$  – коэффициент повышения срока службы нового образца;  
 $n_0$  – коэффициент потерь сырья базового образца;  
 $n_1$  – коэффициент потерь сырья нового образца;  
 $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капвложений;  
 $A_0$  – стоимость одного килограмма сырья;  
 $A_1$  – коэффициент повышения стоимости нового образца;  
 $A_2$  – коэффициент поправки на доставку и монтаж;  
 $A_3$  – коэффициент сопутствующих капвложений;  
 $A_4$  – коэффициент амортизационных отчислений;  
 $A_5$  – коэффициент отчислений на капитальный ремонт;  
 $A_6$  – коэффициент отчислений на техобслуживание;  
 $A_7$  – коэффициент энергозатрат;  
 $A_8$  – коэффициент заработной платы;  
 $A_9$  – коэффициент затрат на спецодежду.

Анализ полученных зависимостей с численными параметрами, соответствующими базовой и усовершенствованной модели с одновременным изменением параметров ресурса для разных объемов переработки и разных затрат сырья [124].

Результаты расчета показаны на рисунке 4.3 [124].

Анализ этих данных показывает, что изменение количества отходов пищевой промышленности оказывает более существенное влияние, чем

увеличение стоимости перерабатываемого сырья или изменение объемов переработки продукции.

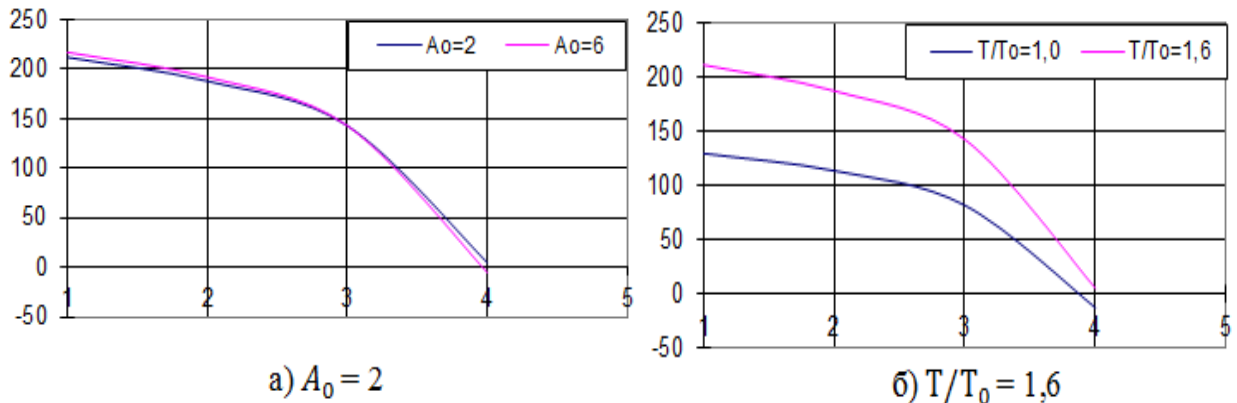


Рисунок 4.3 – Зависимость эффективности работы оборудования от параметров ресурсосбережения (доли отходов 0,2-0,8) для разных: стоимости сырья ( $A_0$ ) и относительной долговечности ( $T/T_0$ )

Расчеты показывают, что при определенных значениях показателя энергосбережения ( $n$ ) работа устройства бесполезна. Также можно сказать, что эффективность устройства зависит от срока службы.

Полученное соотношение такого типа может быть использовано в качестве основы для анализа функциональных затрат при оценке эффективности некоторых научных исследований, проводимых в виде некоторых технических решений [124].

Вышеизложенное показывает, что особенности ресурсосбережения определяют эффективность работы любого оборудования, в том числе пищевого.

Разумеется, положительным путем снижения этих показателей является использование новых технических решений, созданных на основе научного анализа физико-механических характеристик процесса обработки определенного продукта и конструктивных особенностей используемого оборудования.

## 4.2 Оценка технико-экономической эффективности модернизированного аппаратного обеспечения электромагнитного действия производства обогащенного хлеба в особых условиях

Таким образом, практическая значимость методики заключается в том, что она позволяет рассчитать геометрические размеры пекарной камеры, работа которой обеспечивает сохранение нутриентов исходного сырья, а применение комплексных энергетических полей (ультразвукового, при электроконтактном подводе теплоты и инфракрасном излучении) способствуют производству бескоркового хлеба с высокими показателями качества [126].

Для расчета интегрального технико-экономического эффекта применялся метод взвешенной суммы частных показателей эффективности. Важным этапом этого расчета являлось определение весовых коэффициентов для каждого частного показателя эффективности. Для получения весовых коэффициентов использовался метод парных сравнений с привлечением экспертных оценок. Для сравнения частных показателей эффективности построена матрица (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Матрица сравнения частных показателей

|                    |       | Частные показатели |       |       |       |       |       |       |       |       | $\alpha_i$ |
|--------------------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
|                    |       | $K_1$              | $K_2$ | $K_3$ | $K_4$ | $K_5$ | $K_6$ | $K_7$ | $K_8$ | $K_9$ |            |
| Частные показатели | $K_1$ |                    | 2     | 2     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0,14       |
|                    | $K_2$ | 0                  |       | 2     | 1     | 1     | 0     | 2     | 2     | 1     | 0,12       |
|                    | $K_3$ | 0                  | 0     |       | 0     | 1     | 2     | 0     | 0     | 0     | 0,04       |
|                    | $K_4$ | 1                  | 1     | 2     |       | 2     | 2     | 1     | 1     | 1     | 0,15       |
|                    | $K_5$ | 1                  | 1     | 1     | 0     |       | 1     | 0     | 0     | 0     | 0,06       |
|                    | $K_6$ | 1                  | 2     | 0     | 0     | 1     |       | 0     | 0     | 0     | 0,06       |
|                    | $K_7$ | 1                  | 0     | 2     | 1     | 2     | 2     |       | 1     | 1     | 0,14       |
|                    | $K_8$ | 1                  | 0     | 2     | 1     | 2     | 2     | 1     |       | 1     | 0,14       |
|                    | $K_9$ | 1                  | 1     | 2     | 1     | 2     | 2     | 1     | 1     |       | 0,15       |

На основании экспериментальных оценок элементам матрицы  $\beta_{ij}$  присвоены значения, указанные в соотношении и внесенные в таблицу 4.1.

Значения весовых коэффициентов частных показателей эффективности рассчитывались и записывались в таблицу 4.1.

Нормирование значений частных показателей технико-экономической эффективности определялось исходя из сравнения их конкретных значений с предельно допустимыми или эталонными значениями  $K_i^{\text{дир}}$ .

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} = 72; \sum_{j=1}^n \beta_{\alpha_j} = 1,00. \quad (4.13)$$

Особого пояснения требует порядок расчета затрат на изготовление и обслуживание оборудования. Поскольку устройство еще не произведено, стоимость производства возможно оценить на основе известных цен производства аналогичных устройств, входящих в комплект для оценки качества пищевых продуктов. Чтобы учесть разницу в конструктивных параметрах аналогов, рекомендуется использовать значения коэффициентов приведения значений.

С учетом этого стоимость производства устройства рассчитывается по зависимости

$$C_{\text{пр АО}} = C_{\text{ан}} \prod_{i=1}^n \left( \frac{X_{i \text{ АО}}}{X_{i \text{ ан}}} \right)^{b_i}. \quad (4.14)$$

Значение коэффициента торможения цены определялось на основе подбора двух аналогов для устройства с таким расчетом, чтобы устройства по отличающимся параметрам занимало промежуточное место между ними. Коэффициент торможения цены  $b_i$  рассчитывался по зависимости (4.14).

Затраты на хранение устройства рассчитывались зависимости (4.15)

$$C_{\text{хр АО}} = \sum_{t=1}^n \frac{Z_t}{(1+t)^t}. \quad (4.15)$$

Значения частных нормированных показателей технико-экономической эффективности оборудования для производства бескоркового хлеба, входящих в комплект конвейерной хлебопекарной печи, приведены в таблице 4.1. Результаты расчета технико-экономической эффективности для существующих образцов хлебопекарных печей по полученной

регрессионной зависимости показали, что она эффективнее известных аналогов на 9 – 18 %.

В таблицах 4.2 и 4.3 представлены результаты расчетов технико-экономической эффективности разработанных в исследовании технических решений.

Таблица 4.2 – Значение частных нормированных показателей экономической эффективности  $K_1^H$

| Тип лаборатории                      | Значение частных показателей |         |         |         |         |         |         |         |         | Обобщенный показатель |
|--------------------------------------|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|
|                                      | $K_1^H$                      | $K_2^H$ | $K_3^H$ | $K_4^H$ | $K_5^H$ | $K_6^H$ | $K_7^H$ | $K_8^H$ | $K_9^H$ |                       |
| Электрическая хлебопекарная печь     | 0,6                          | 0,8     | 1       | 0,9     | 0,7     | 0,7     | 1,5     | 0,7     | 0,75    | 0,8                   |
| Электроконтактная хлебопекарная печь | 0,7                          | 0,8     | 1       | 0,9     | 0,8     | 0,7     | 1,5     | 0,7     | 0,75    | 0,8                   |
| Конвейерная хлебопекарная печь       | 0,9                          | 0,9     | 1       | 1       | 1       | 0,9     | 0,9     | 0,9     | 1       | 0,87                  |

Таблица 4.3 – Результаты оценки экономической эффективности технических решений модернизации аппаратного оборудования для производства обогащённого хлеба

| Наименование технических решений | Технико-экономическая эффективность |               | Эффективность               |               |
|----------------------------------|-------------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|
|                                  | Предлагаемый образец, $K_o$         | Аналог, $K_o$ | Предлагаемый образец, $K_o$ | Аналог, $K_o$ |
| Конвейерная хлебопекарная печь   | 0,87                                | 0,67          | 0,83                        | 0,75          |
| Рамная мешалка                   | 0,88                                | 0,76          | 0,88                        | 0,73          |

Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенные технические решения обеспечивают повышение эффективности производства обогащённого хлеба, соответствующего профилактическому назначению. Применение физических методов комплексного воздействия (ультразвуковой кавитации, электроконтактного прогрева, инфракрасного излучения) на тестозаготовку улучшает органолептические показатели хлеба на 12-16 %, повышает пищевую ценность на 9-12 %, снижает продолжительность производства в 1,2-5 раз и энерго- и трудозатраты на 9-17 %; меланоидинообразования и образование

канцерогенов, расширение ассортимента хлебобулочных изделий, что позволяет приготовить требуемые по качеству продукты для функционального питания (рисунок 4.4) [126].

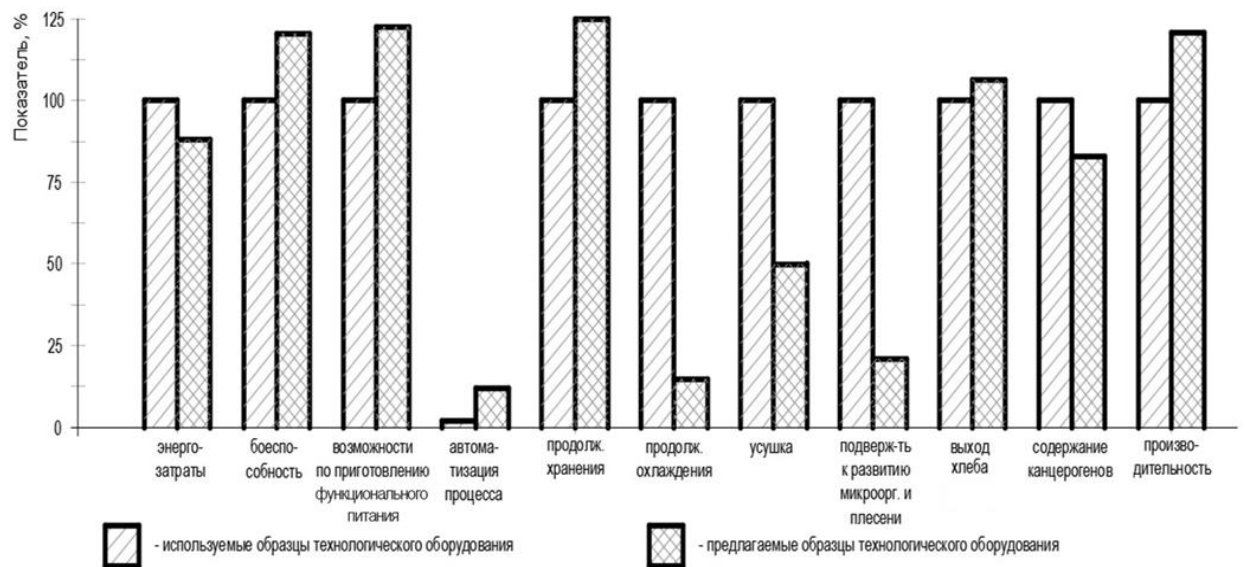


Рисунок 4.4 – Технико-экономическая эффективность от реализации предложенных технических и технологических решений

Результаты оценки предложенного в исследовании аппаратного оборудования производства обогащённого хлеба представлены на рисунке 4.5.

Проведенная оценка показала, что применение предложенного аппаратного оборудования для приготовления обогащенного хлеба обеспечивает повышение его эффективности и способствует сокращению сроков производства в обособленных условиях проживания. Экономия от включения его в штат подразделений может составлять более 0,5 млн руб. в год.

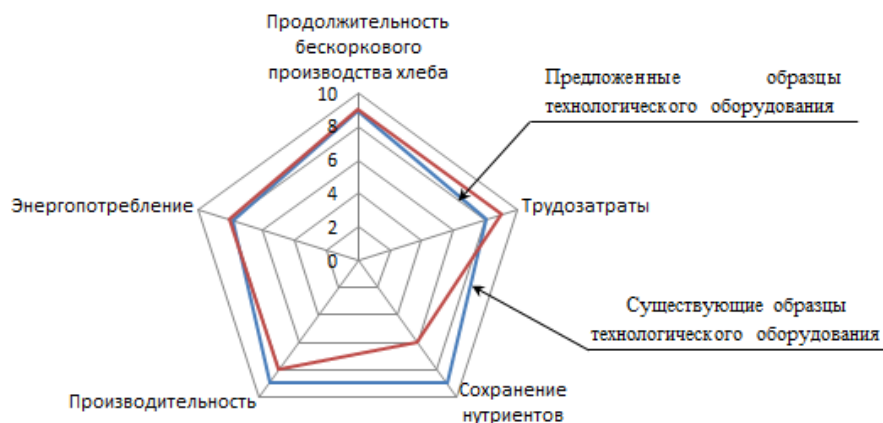


Рисунок 4.5 – Оценка возможностей аппаратного обеспечения производства хлеба

### 4.3 Практические рекомендации по применению результатов исследования

Вариант размещения предложенного модернизированного технологического оборудования в кузове-фургоне полевого технического средства продовольственной службы показано на рисунке 4.6, а размещение источников инфракрасного и ультрафиолетового излучения внутри полевой конвейерной хлебопекарной печи (рисунок 3.13).

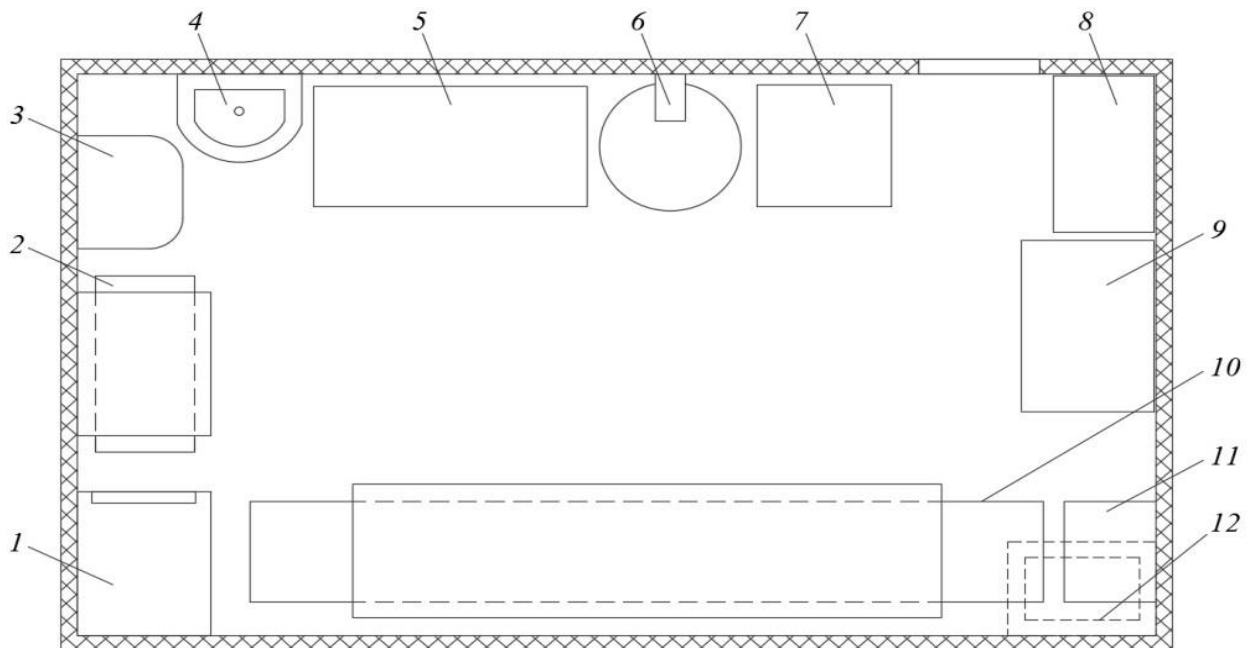


Рисунок 4.6– Размещение аппаратного обеспечения в технологическом блоке:

- 1 – расстоечный шкаф; 2 – бак для воды; 3 – электронагреватель проточного типа; 4 – раковина; 5 – стол производственный; 6 – месильно-сбивальная машина; 7 – шкаф для ингредиентов; 8 – шкаф для одежды; 9 – стеллаж для готовой продукции; 10 – конвейерная хлебопекарная печь; 11 – приемник готовой продукции; 12 – генератор

Направлениями дальнейших исследований в области обоснования технико-экономических требований к техническому оснащению органов продовольственной службы и рационального уровня обеспечения современными образцами технических средств (ТС) и технологического оборудования приготовления пищи являются разработка методических

подходов к определению показателей мобильности, живучести, автономности ТС приготовления пищи в различных природно-климатических условиях; теоретические и экспериментальные исследования в области оценки реального технического состояния технических средств приготовления пищи и уровня их технико-экономической эффективности; разработка робототехнических комплексов приготовления и доставки горячей пищи наземным и воздушным транспортом населению, проживающему в удаленных от мест пополнения запасов районах, и мобильных технических средств хранения продовольствия и воды, приготовления горячей пищи для групп людей численностью до 250 человек на ТС размещенных на автомобильном базовом шасси, в особых условиях, устройств, обеспечивающих заготовку, фильтрацию воды из атмосферного воздуха; разработка продуктов питания повышенной пищевой ценности при снижении их массы и приедаемости, повышения калорийности индивидуального рациона питания за счет включения высококалорийных модифицированных продуктов питания.

### **Выводы по главе**

1. Сформулированы общие принципы оценки эффективности новых технических решений в виде последовательности вычисления важнейших технико-экономических параметров реализуемого технологического процесса.

2. Оценены рекомендации по формированию и итоговые результаты технико-экономического анализа эффективности выполненных разработок по корректировке хлеба и модернизации аппаратного обеспечения: месильная камера для замеса теста в месильно-сбивальной машине (патент РФ № 216005); хлебопекарная электрическая печь (патент РФ № 214961), позволяющего обеспечить производство обогащенного хлеба в особых условиях проживания населения.

3. Определены направления дальнейших исследований в области обоснования технико-экономических требований к аппаратному обеспечению приготовления пищи, в обособленных условиях проживания (вахтовые поселки, геолого-разведочные партии, пункты постоянной дислокации подразделений МЧС и других силовых структур) в районах Крайнего Севера, Арктики, удаленного таежного и горного поселения и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения исследования достигнута его цель, решена актуальная научная задача, заключающаяся в обосновании модернизации аппаратного обеспечения электромагнитного и акустического действия производства обогащенного хлеба в особых условиях проживания населения, на основе методологии и методов электрофизики, газодинамики, теории машин и механизмов, физико-химического анализа, методов исследования операций и процессов, теории планирования эксперимента, получены следующие основные научные результаты:

1. Проанализированы существующие проблемы производства хлеба в особых условиях, состоящие в отсутствии мобильных образцов аппаратного оборудования для обеспечения быстрой системной перекомпоновки линий производства конкретного вида хлеба, обусловленных требованиями особых условий;

2. Проведена оценка современных рецептур, технологии и аппаратного оборудования для производства обогащенного хлеба в особых условиях выявившая отсутствие методик расчета степени его «полноценности» производства для конкретных особых условий обособленного размещения;

3. Выявлены возможности совершенствования процессов и аппаратного оборудования использующего электромагнитный эффект свидетельствующие о возможности обеспечения режимов таких переходных процессов, которые позволяют существенно сократить время срабатывания микровыключателей изменением крутизны импульса;

4. Оценено состояние разработок аппаратного оборудования для соответствия требованиям по приготовлению обогащенного хлеба говорящее о возможности использования ИК-излучения при строгом следовании закону Бугера;

5. Исследованы возможности корректировки рецептуры хлеба для повышения его пищевой ценности позволившие рекомендовать в качестве базовых следующие соотношения пищевых веществ:

ограничение по белкам:

$$7,1x_1 + 10,9x_2 + 10,8x_3 \geq 45,$$

$$7,1x_1 + 10,9x_2 + 10,8x_3 \leq 55;$$

ограничение по жирам:

$$8,3x_1 + 15,6x_2 + 8,8x_3 \geq 30,$$

$$8,3x_1 + 15,6x_2 + 8,8x_3 \leq 60;$$

ограничения по углеводам:

$$17,1x_1 + 20,3x_2 + 5,4x_3 \geq 70,$$

$$17,1x_1 + 20,3x_2 + 5,4x_3 \leq 100.$$

6. Осуществлено моделирование модернизированной рамной мешалки для приготовления белково-жировых эмульсий с режимами применением электромагнитных эффектов выявившие необходимость изменения параметров электропитания таким образом, чтобы предварительная обработка УЗ (уровня звукового давление – 140 дБ при частоте  $22 \pm 1,65$  кГц) генерируемых магнитострикторами осуществлялась при перемешивании и нагреве в течение 60 минут;

7. Выполнено моделирование модернизированной конвейерной хлебопекарной печи электромагнитного действия для электроконтактной выпечки хлеба в поле инфракрасного излучения, при следующих режимах: длина волны  $\lambda=4-9$  мкм, проникающая способность  $I_{\text{пс}}=4-5$  мм, время выпечки 7,2 минуты;

8. Сформулированы основные требования к методике планирования экспериментальных исследований, включающие построение нелинейных линейных регрессионных моделей.

$$Y_1 = 18,726 + 0,142x_1 + 0,001x_2,$$

$$Y_2 = 17,800 - 0,304x_1 + 0,036x_2.$$

9. Экспериментальное уточнение процесса применения магнитострикционного эффекта в смесителе при тестоприготовлении с построением ротатбельных моделей его рациональной работы привело к следующим уравнениям:

$$Y_1 = 19,724 + 0,972x_1 + 0,095x_2 + 0,009x_1^2 - 0,025x_1x_2;$$

$$Y_2 = 186,767 - 22,059x_1 - 1,459x_2 + 0,057x_1^2 - 0,001x_2^2 - 0,207x_1x_2;$$

10. Выявлены технологические параметры работы пекарной камеры при выпечке обогащенного бескоркового хлеба с применением электромагнитно-упругого эффекта обеспечиваемого биметаллической пластиной;

11. Сформулированы общие принципы оценки эффективности новых технических решений в виде последовательности вычисления важнейших технико-экономических параметров реализуемого технологического процесса;

12. Разработаны предложения модернизации технических средств производства обогащенного хлеба в особых условиях и проведена оценка результатов технико-экономического анализа эффективности выполненных разработок по корректировке аппаратного оборудования производства обогащенного хлеба и его рецептуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абушинов, Э. В. Обеспечение работоспособности технических средств приготовления пищи в условиях низких температур окружающей среды / Н.А. Ермошин, С. А. Романчиков, Ю. Ю. Каштанов, Э. В. Абушинов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10, № 2(54). – С. 136-140. – DOI 10.46548/21vek-2021-1054-0026.
2. Абушинов, Э. В. Технические решения модернизации технологического оборудования для выпечки хлебобулочных изделий с использованием ресурсосберегающих технологий / Э. В. Абушинов, О. И. Николук // Юность и знания - гарантия успеха -2020 : Сборник научных трудов 7-й Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Курск, 17-18 сентября 2020 года / Отв. редактор А.А. Горохов. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 14-19.
3. Авторское свидетельство СССР N 997772, кл. В 01F 7/04, 1983.
4. Авторское свидетельство СССР N 1327944, кл. В 01F 7/16, 1987.
5. Авторское свидетельство СССР N 1308371, кл. В 01F 7/16, 1987.
6. Авторское свидетельство СССР N 1542601, кл. В 01F 7/18, 1990.
7. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский // – М.: Наука. – 1976. – 280 с.
8. Алексеев, Г. В. Научные основы создания ресурсосберегающих процессов и аппаратов абразивной переработки пищевого сырья : специальность 05.18.12 "Процессы и аппараты пищевых производств" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Алексеев Геннадий Валентинович. – Санкт-Петербург, 2002. – 387 с.
9. Алексеев, Г.В., Даниленко, Е.А. Гидродинамическая модель измельчения кальцийсодержащих пищевых добавок / Е.А. Даниленко, Г.В. Алексеев // Процессы и аппараты пищевых производств. – 2010. – № 2. – С. 97-102.

10. Алексеев, Г. В. Численные методы при моделировании технологических машин и оборудования : учебное пособие / Г. В. Алексеев, Б. А. Вороненко, М. В. Гончаров, И. И. Холявин. – Санкт-Петербург : ГИОРД, 2014. – 200 с.

11. Алексеев, Г. В., Алексеев, Г. В., Савельев, А. П., Холявин И. И., Ивлева Е. Н. Возможности совершенствования оборудования по получения бездрожжевого теста для сдобной выпечки / Г. В., Савельев А. П. Алексеев, И. И. Холявин, Е. Н. Ивлева // В сборнике: Информационные системы и технологии АПК и ПГС. Сборник научных статей Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. Курск, 2023. – С. 366-369.

12. Антипов, С. Т., Журавлев, А. В., Казарцев, Д. А., Мордасов, А. Г. Инновационное развитие техники пищевых технологий / С.Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казурцев, А. Г. Мордасов // монография. Лань. – 2016. – 660 с.

13. Антуфьев, В. Т., Андреев А. Н., Горшков Ю. Г., Русакевич О. Н. Инновационные аспекты разработки ресурсосберегающего процесса выпечки хлебобулочных изделий в поле действия ультразвука / В. Т. Антуфьев, А. Н. Андреев, Ю. Г. Горшков, О. Н. Русакевич // Процессы и аппараты пищевых производств. – 2009. – № 1. – С. 45–51.

14. Арсеньева Т. П. Моделирование низколактозного высокобелкового замороженного десерта на козьем молоке / Т.П. Арсеньева, М.В. Лугова // Colloquium-Journal. – 2020. – № 19-1(71). – С. 31-34. – DOI 10.24411/2520-6990-2020-12044.

15. Ауэрман, Л. Я. Технология хлебопекарного производства / Л.Я. Ауэрман. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 415 с.

16. Барышников, А. Н., Володарский А. В., Михелев А. А. О прогреве тестовых заготовок в процессе выпечки // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – № 5, – 1972. – С. 8-10.

17. Благовещенская, М. М. Разработка и исследование метода автоматического измерения качества хлебопекарного теста : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.07. – М.: – 1975. – 175 с.

18. Благовещенская, М. М., Петров, И. К., Мачихин, С. А. Влияние температуры на реологические свойства теста различной влажности. – Известия вузов. Пищевая технология, – 1974. – № 5. – С. 48-50.

19. Беляева, М. А. Оборудование предприятий общественного питания. Тепловое оборудование. М.: – 2016. Т.3. – С. 158–242.

20. Верболоз, Е. И. Использование переходных процессов в электрических сетях для формирования импульсного режима их работы / Е. И. Верболоз, А. А. Лоза, А. Г. Леу // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2017. – № 4(18). – С. 80-84.

21. Владимиров, Ю. А., Рощупкин, Д. И. Действие УФ-излучения на мембранные структуры клеток // Биологическое действие ультрафиолетового излучения. – М.: Наука, – 1975. – С. 31-39.

22. Володарский, А. В., Хряпа, В. М. и др. Математический эксперимент и оптимальная конструкция хлебопекарной печи / Журнал Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1997. – № 1. – С. 30-32.

23. Воробьев, В. И. Химические и микробиологические показатели кожи и чешуи рыб при переработке и получении новой пищевой продукции / В. И. Воробьев, О. В. Казимирченко, Е. В. Нижникова // Известия КГТУ. – 2022. – № 64. – С. 81-94. – DOI 10.46845/1997-3071-2022-64-81-94.

24. Вороненко, Б. А. и др. Анализ характера особенностей тепломассообмена в дискретной насыпи пищевого продукта / Э. В. Абушинов, Б. А. Вороненко, А. Г. Леу, И. П. Юхник // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. Сборник науч. статей VII Международной научно-технической конференции. 2020. – С. 713-716.

25. Гинзбург, А. С. Современные конструкции хлебопекарных печей / А.С. Гинзбург // – М.: Пищепромиздат, – 1958. – С. 40-45.

26. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. – М.: Пищевая промышленность, – 1966. – 376 с.
27. Гинзбург А.С., Сыроедов В.И, Скверчак В.Д., Плаксин Ю.М. и др. Актуальные вопросы теории и практики выпечки / Обзорная информация. – М.: ЦНИИТЭИ Пищепром, – 1999. – 29 с.
28. Глушанова, Н. А. Взаимоотношения пробиотических и индигенных лактобацилл хозяина в условиях совместного культивирования *in vitro* / Н. А. Глушанова, Б. А. Шендеров // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. – 2005. – № 2. – С. 56-61.
29. Головкина Н. А. Применение ультрафиолетовых лучей в пищевой промышленности. – Л.: – 1958. – 173 с.
30. Голубев В.Н., Жиганов И.Н. Пищевая биотехнология, – М.: ДеЛи принт. – 2001. – С. 72-73.
31. Государственная программа Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (утв. постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 328 (с изменениями утвержденными постановлением Правительства РФ от 31.03.2017 г. № 328-13)).
32. ГОСТ 12.1.007-76 Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – 1976. – 46 с.
33. ГОСТ Р ИСО 9000-2001. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Изд-во стандартов, – 2003. – С. 39-43.
34. ГОСТ Р 52349-2005 Продукты пищевые. Продукты пищевые функциональные. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, – 2006. – 30 с.
35. ГОСТ Р 55577-2013. Продукты пищевые специализированные и функциональные информация об отличительных признаках и эффективности. – М.: Изд-во стандартов, – 2013. – 28 с.
36. Грачев Ю. П., Плаксин Ю. Н. Математические методы планирования эксперимента. – М.: ДеЛи принт, 2005.

37. Демченко В.А., Савельев, А. П. Метод оценки ресурсоемкости технологического процесса производства мучных изделий / А. П. Савельев, В. А. Демченко // Материально-техническое обеспечение военной организации государства в условиях современных вызовов : сборник научных статей XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 17 февраля 2023 года. Том Часть II. – Пермь: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации», 2023. – С. 259-268.

38. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 21.01.2020 г. № 20.

39. Даниленко, Е. А. Гидродинамическая модель измельчения кальцийсодержащих пищевых добавок / Е. А. Даниленко, Г. В. Алексеев // Процессы и аппараты пищевых производств. – 2010. – № 2. – С. 97-102.

40. Ермошин, Н. А. Методологические аспекты научного обоснования технических решений модификации технических средств и технологического оборудования продовольственной службы / Н. А. Ермошин, С. А. Романчиков // Ползуновский вестник. – 2020. – № 2. – С. 100-106.

41. Ермошин, Н. А. Совершенствование производства хлебопродуктов для группировок войск (сил) в особых условиях / Н. А. Ермошин, С. А. Романчиков // Военная мысль. – 2018. – № 3. – С. 19-26.

42. Зорин, В.М., Клименко, А.В., Зорина, В.М., Клименко, А.В. Теплоэнергетика и теплотехника: М. – Издательство МЭИ, 2001 г. ISBN: 5-7046-0512-5, 5-7046-0515-X.

43. Изтелеу, Б. М. Исследование и идентификация пектиновых веществ выделенных из клубней топинамбура / Б. М. Изтелеу, Г. Н. Азимбаева, Г. Н. Кудайбергенова, Б. М. Бутин // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 3-2. – С. 269-274.

44. Иванова, М. А. Разработка ресурсосберегающего процесса выпечки мелкоштучных булочных изделий с наложением поля ультразвука :

специальность 05.18.12 "Процессы и аппараты пищевых производств" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванова Марина Александровна. – Санкт-Петербург, 2012. – 168 с.

45. Касаткин, В. В. Научное обоснование энергосберегающих электротехнологий и оборудования сублимационной сушки жидких термолабильных продуктов пищевого назначения : специальность 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Касаткин Владимир Вениаминович. – Санкт-Петербург, 2004. – 386 с.

46. Камалова, М. Б. Совершенствование процесса выпечки узбекских лепешек с использованием ИК энергоподвода / М.Б. Камалова [и др.] // Тез. докл. 6 всес. науч.-техн. конф. «Электрофиз. Методы обработки пищ. продуктов и с.-х. сырья». – М.: 1989. – С. 165–166.

47. Ключкин В. В., Пахоменкова, Т. П. Об интенсификации процесса экстрагирования применительно к пористым материалам при наложении пульсаций / В. В. Ключкин, Т. П. Пахоменкова // Журнал Пищевая химия № 4. 1984. – С. 846-849.

48. Ключкин В. В., Пахоменкова, Т. П., Михайлова, Т. Н. О влиянии гармонического изменения перепада давления на характер движения жидкой фазы в массообменных аппаратах / В. В. Ключкин, Т. П. Пахоменкова, Т. Н. Михайлова // Журнал Пищевая химия. 1984. № 4. – С. 841-845.

49. Кондратов, А. В. Совершенствование процесса и аппарата с использованием кавитационного эффекта для измельчения комбинированных рыбопродуктов : специальность 05.18.12 "Процессы и аппараты пищевых производств" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кондратов Аркадий Владимирович. – Санкт-Петербург, 2008. – 16 с.

50. Косой, В.Д. Инженерная реология биотехнологических сред [Текст] / В.Д. Косой, Я.И. Виноградов, А.Д. Малышев. – СПб.: ГИОРД, 2005. – 648 с.

51. Королев, Д. Н. Разработка технологии пшеничного хлеба с использованием полбяной муки / Д. Н. Королев, Е. В. Хмелева, Ю. В. Пенькова // Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия. – 2019. – Т. 26. – С. 57-64.

52. Кравчук Е.П. Влияние ультрафиолетового облучения на антибактериальные свойства молока. Труды ВНИИВС. – М.: 1968, т. 30. – С. 134-139.

53. Краснова, М. С. Электроконтактная выпечка хлеба как объект автоматизации / М. С. Краснова, Г. А. Сидоренко, В. П. Попов [и др.] // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. – № 1(150). – С. 187-191.

54. Краснова, М.С, Необходимость и возможность автоматизации электроконтактной выпечки хлеба / М. С. Краснова, В. П. Попов, Г. А. Сидоренко, Т. В. Ханина // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием), Оренбург, 30 января – 01 2013 года. – Оренбург: Издательско-полиграфический комплекс "Университет", 2013. – С. 994-1000.

55. Краснопевцев, Н. И. Основные вопросы расчета и конструирования печей / Н. И. Краснопевцев // Хлебопекарная промышленность. – 1996. № 10. – С. 7-19.

56. Краснопевцев, Н. И. Основные положения при анализе и проектировании хлебопекарных печей // Хлебопекарная промышленность. – 1995. № 6. – С. 9-13.

57. Кретович, В. Л. Проблемы пищевой полноценности хлеба / В. Л. Кретович, Р. Р. Токарева // – М.: Наука, 1978. – 250 с.

58. Кулишов, Б. А. Проблема стабильности бета-каротина в пищевых продуктах / Б. А. Кулишов, К. Е. Кулишова, Н. В. Рудометова [и др.] // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке : IX Международная научно-техническая конференция, Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 года.

Том 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2019. – С. 131-137.

59. Кулишов, Б. А. Исследование процесса электроконтактного нагрева при производстве хлеба и совершенствование аппарата для его осуществления : специальность 05.18.12 "Процессы и аппараты пищевых производств" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кулишов Борис Александрович, 2021. – 308 с.

60. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. Для вузов. – 7-изд., испр. - М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

61. Магомедов, Г. О. Научные и практические основы технологии сбивных функциональных хлебобулочных изделий / Г. О. Магомедов, Е. И. Пономарева // М-во образования и науки РФ, ГОУ ВПО "Воронежская гос. технологическая акад." – Воронеж : Воронежская гос. технологическая акад., 2010. – 247 с. – ISBN 978-5-89448-799-1.

62. Магомедов, Г. О., Пономарева, Е. И., Рыжов В. В. Влияние формы месильной лопасти на энергетические характеристики сбивания и качество бездрожжевого полуфабриката / Г. О. Магомедов, Е. И. Пономарева, В. В. Рыжов // Хлебопродукты. – 2011. – № 10. – С. 48-49.

63. Магомедов, Г.О. Конструктивные и технологические приемы интенсификации замеса теста и повышения качества хлеба / Г. О. Магомедов, В. Л. Чешинский, Ю. Н. Труфанова [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2019. – Т. 81, № 1(79). – С. 232-237. – DOI 10.20914/2310-1202-2019-1-232-237.

64. Маклюков, В. И. Анализ методов моделирования процесса выпечки хлеба / В. И. Маклюков // Хлебопродукты. – 2021. – № 7. – С. 26-32. – DOI 10.32462/0235-2508-2021-30-7-28-32.

65. Маклюков, В. И. Исследование процесса нагрева ржано-пшеничных тестозаготовок электро-контактным способом / Э. О. Герасимова, Н. В.

Лабутина, В. И. Маклюков, Е. Н. Rogozkin // Хлебопродукты. – 2020. – № 4. – С. 60-61. – DOI 10.32462/0235-2508-2020-29-4-60-61.

66. Малахов Л. Н., Дьяченко С. В. Математическая модель сушки дисперсных продуктов в активном гидродинамическом слое / Н. Н. Малахов, С. В. Дьяченко, Е. Г. Папуш, О. А. Клименчук // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2005. – № 2-3(285-286). – С. 97-102.

67. Малахов, Л. Н., Дьяченко, С. В. Совершенствование основного технологического оборудования мини-пекарен. – М.: Пищевая промышленность. – 2000. – № 3. – С. 60-61.

68. Матвеева, И.В. Новое направление в создании технологии диабетических сортов хлеба. Обзор. инф. Серия: Хлебопекарная и макаронная промышленность. / И. В. Матвеева, А. Г. Утарова, Л.И. Пучкова и др. – М.: ЦНИИТЭИ Хлебопродуктов, –1991. – 44 с.

69. Нечаев А.П., Скурихин И.М. Все о пище с точки зрения химика: Справочное издание. – М.: Высшая школа, 1991. – 288 с.

70. Николук, О. И. Устройство для выпечки хлебобулочных изделий электроконтактным способом / О. И. Николук, Э. Ф. Абдурахманов, Э. В. Абушинов // Юность и знания - гарантия успеха -2020 : Сборник научных трудов 7-й Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Курск, 17–18 сентября 2020 года / Отв. редактор А.А. Горохов. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 88-92.

71. Николук, О. И. Устройство для интенсификации охлаждения хлеба в особых условиях / О.И. Николук // Хлебопродукты. 2019. № 6. С. 48-51. DOI: 10.32462/0235-2508-2019-28-6-48-51.

72. Новацкий, В. Электромагнитные эффекты в твердых телах: Пер. с польск. – М.: Мир, – 1986. – 160 с.

73. Новосёлов, А. Г. Способы обогрева пекарной камеры хлебопекарной печи. Электроконтактная выпечка / А. Г. Новоселов, А. С. Громцев, Н. В. Агеенков, С. А. Громцев // Научные проблемы материально-

технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации. – 2018. – № 3(9). – С. 123-131.

74. Нугманов, А. Х. Х. Теория и практика проектирования пищевых систем на основе феноменологического подхода : специальность 05.18.12 "Процессы и аппараты пищевых производств" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Нугманов Альберт Хамед-Харисович, 2017. – 523 с.

75. Нугманов, А. Х. Х. Рекомендуемая схема камеры для выпечки хлеба с использованием инфракрасного излучения / А. Х. Х. Нугманов, И. Е. Волков, А. А. Сугаров // Хлебопродукты. – 2025. – № 6. – С. 30-33. – DOI 10.32462/0235-2508-2025-34-6-30-33.

76. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года (Указ Президента Российской Федерации от 5 марта 2020 г. № 164).

77. Остриков, А. Н., Абрамов О. В. Расчёт и конструирование машин и аппаратов пищевых производств. – СПб.: ГИОРД, 2003. – 352 с.

78. Островский, Я. Г. Исследование процессов приготовления заварки и выпечки бескоркового хлеба электроконтактным нагревом: дисс. ... канд. техн. наук Я. Г. Островский. – М, 1954. – 182 с.

79. Парахина, О. И. Установление сроков годности хлебобулочных изделий: состояние вопроса / О. И. Парахина, О. А. Савкина, Л. И. Кузнецова [и др.] // Хлебопродукты. – 2025. – № 8. – С. 28-33. – DOI 10.32462/0235-2508-2025-34-8-28-33.

80. Парахина, О. И. Применение растительного сырья для продления сроков годности хлебобулочных изделий: состояние вопроса и перспективы / О. И. Парахина, О. А. Савкина, М. Н. Костюченко [и др.] // Пищевая промышленность. – 2025. – № 6. – С. 46-52. – DOI 10.52653/PPI.2025.6.6.010.

81. Патент № 2702089 С1 Российская Федерация, МПК А21D 13/04. Хлеб повышенной пищевой ценности и способ его изготовления : № 2018147043 : заявл. 27.12.2018 : опубл. 03.10.2019 / В. В. Долгих.

82. Патент на полезную модель № 166850 U1 Российская Федерация, МПК A21B 7/00. устройство для выпечки зернового хлеба : № 2016112198/13 : заявл. 31.03.2016 : опубл. 10.12.2016 / А. А. Сычев, С. А. Романчиков, В. И. Пахомов, А. А. Целыковских ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва" Министерства обороны Российской Федерации.

83. Патент на полезную модель № 158128 U1 Российская Федерация, МПК A21B 1/00. Устройство для производства хлебобулочных изделий : № 2015100836/10 : заявл. 12.01.2015 : опубл. 20.12.2015 / С. А. Романчиков, М. В. Безгин, В. Т. Антуфьев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва" Министерства обороны Российской Федерации.

84. Патент на полезную модель № 216005 U1 Российская Федерация, МПК A21C 1/06, A21C 1/14. Месильная камера для замеса теста в месильно-сбивальной машине : № 2022114155 : заявл. 25.05.2022 : опубл. 12.01.2023 / С. А. Романчиков, Г. В. Алексеев, И. Ж. Исаков, Д. В. Сызранцев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева" Министерства обороны Российской Федерации.

85. Патент на полезную модель № 214961 U1 Российская Федерация, МПК A21B 1/00, A21B 1/40. Хлебопекарная электрическая печь : № 2022114156 : заявл. 25.05.2022 : опубл. 22.11.2022 / С. А. Романчиков, Г. В. Алексеев, И. Ж. Исаков, Д.В. Сызранцев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военная академия материально-технического обеспечения

имени генерала армии А.В. Хрулева" Министерства обороны Российской Федерации.

86. Патент на полезную модель № 217594 U1 Российская Федерация, B01J 19/10. Ультразвуковой проточный реактор: № 2022129168 : заявл. 09.11.2022 : опубл. 07.04.2023 / Алексеев А. Г., Довбня С. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет при Межпарламентной Ассамблее ЕврАзЭС».

87. Патент на изобретение № 2399207 Российская Федерация, A21C 1/00. Устройство для выпечки формового хлеба с конвейером: № 2009104665/13 : заявл. 11.02.2009 : опубл. 20.09.2010 / Ялалетдинова Д. И., Сидоренко Г. А., Попов В. П., Коротков В. Г. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет».

88. Поландова, Р. Д., Богатырева, Т. Г. Основные направления исследований по биохимии и микробиологии в хлебопечении // Хлебопродукты. – 1993. – № 3. – С. 32–37.

89. Пономарева, А. Н. Участие свободных аминокислот в реакции меланоидинообразования при изготовлении хлеба [Текст] : Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата биол. наук / Моск. технол. ин-т пищевой пром-сти. - Москва : [б. и.], 1964. – 272 с.

90. Постановление Правительства РФ от 29 декабря 2007 г. № 946 «О продовольственном обеспечении военнослужащих и некоторых других категорий лиц, а также об обеспечении кормами (продуктами) штатных животных воинских частей и организаций в мирное время» с изменениями внесенными постановлением Правительства РФ от 8 декабря 2008 г. № 931.

91. Постников, В. В., Ультразвуковая пластификация лигнина в модифицированной древесине [Текст] / В.В. Постников, Н.С. Камалова, С.В.

Кальченко // Известия РАН. Серия физическая. – 2010. – Том 74. – № 9. – С. 1375-1376.

92. Правила устройства электроустановок (ПУЭ, -7 изд., перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, – 2003.

93. Рогов, И. А., Куцакова, В. Е., Филиппов, В. И., Фролов, С. В. Консервирования пищевых продуктов холодом. Теплофизические основы. – М.: Колос, – 1999. – 174 с.

94. Рогов, И. А., Горбатов, А. В. Физические методы обработки пищевых продуктов // Пищевая промышленность. – 1974. – 580.

95. Романчиков, С. А. Технология конвективного теплообмена между теплоносителем и изделием (хлебом) / С. А. Романчиков // Хлебопродукты. 2019. № 2. – С. 47–51. DOI: 10.32462/0235-2508-2019-28-2-47-51.

96. Романчиков, С. А. Гришин, А. В., Сидоров, Е. М. Перспективы развития модифицированных видов продовольствия / С. А. Романчиков, А. В. Гришин, Е. М. Сидоров // В сборнике: Проблемы воспроизводства общественного капитала в контексте глобального неравенства Материалы IX Международной заочной научно-практической конференции. – 2014. – С. 131-138.

97. Рустамбекова, Ф. Ф., Бобоев, А. Х. Свойство пектина из концентрата топинамбура, полученного по инновационной технологии // Universum: Технические науки: электрон.научн. журн. 2019. № 2(59). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/6928>.

98. Рыжов, В. В. Научно-практическое обеспечение процесса сбивания при производстве хлеба из пшеничной муки: дисс. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Воронеж, – 2015. – 138 с.

99. Савельев, А. П. Конструкция энерго-и ресурсосберегающей пекарной камеры / Г. В. Алексеев, Н. Е. Титова, А. П. Савельев, О. И. Николук // М.: Хлебопродукты, 2018. – № 9, – С. 55-58.

100. Селягин, В. Г., Энкина, Л. С., Фихтенгольц, Н. Н. Влияние СВЧ нагрева Справочная книга по светотехнике. / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: – 952 с.
101. Сидоренко, Г. А. Разработка технологии производства зернового хлеба с применением электроконтактного способа выпечки: монография / Г. А. Сидоренко, В. П. Попов, Д. И. Явкина, Г. Б. Зинюхин, В. Г. Коротков // – Оренбург: ОГУ, – 2015. – 209 с. ISBN 978-5-7410-1472-1.
102. Сидоренко, Г. А., и др. Электроконтактный энергоподвод при выпечке хлеба / Г. А. Сидоренко, В. П. Попов, Г. Б. Зинюхин, А. Г. Зинюхина, Д. И. Ялалетдинова // Вестник оренбургского государственного университета. – 2012. – № 1 (137). – С. 214-221.
103. Сидоренко, Г. А. Разработка технологии производства хлеба с применением электроконтактного способа выпечки: монография / Г. А. Сидоренко, В. П. Попов, Г. Б. Зинюхин, В. Г. Коротков // Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, – 2012. – 124 с.
104. Скурихин И.М., Нечаев А.П. Все о пище с точки зрения химика / И. М. Скурихин, А. П. Нечаев // – М.: Высшая школа, – 1991. – 288 с.
105. Скурихин И. М., Как правильно питаться / И. М. Скурихин [и др.]. – М.: Агропромиздат, –1989. – 255 с.
106. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. № 645.
107. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 года.
108. Стратегия повышения качества пищевой продукции до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 29 июня 2016 № 1364-р).
109. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Указ Президента РФ от 02.07.2021 г. № 400.
110. Сызранцев, Д. В. Возможности производства хлеба варьированных рецептур в особых условиях / Г. В. Алексеев, А. С. Гарницкая,

О. И. Николук, Д. В. Сызранцев, О.В. Агеев // Хлебопродукты. – 2025. – № 11. – С. 44-48. DOI: 10.32462/0235-2508-2025-34-11-44-48.

111. Сызранцев, Д. В. Возможности совершенствования оборудования для повышения качества выпечных кондитерских изделий / Д. В. Сызранцев, Е. Н. Ивлева, Г. В. Алексеев // Современные наука и образование: достижения и перспективы развития. Сборник материалов XXX международной очно-заочной научно-практической конференции. – М.: Издательство НИЦ «Империя», – 2023. – С. 17-21.

112. Сызранцев, Д. В. Возможности цифровизации разработки рациона здорового питания / Д. В. Сызранцев, Е. Н. Ивлева, В. М. Сикорская, Г. В. Алексеев // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2022. Т. 17. – № 4. – С. 1907-1912.

113. Сызранцев, Д. В. Влияние новых технических разработок на ресурсосбережение переработки пищевого сырья / Д. В. Сызранцев // Проблемы материально-технического обеспечения Росгвардии в современных условиях и пути их решения. Сборник научных статей XI научно-практической конференции с международным участием, ч.II. – Пермь, – 2022. – С. 238-241.

114. Сызранцев, Д. В., Ермошин, Н. А. Имитационная модель выпечки хлебопродуктов электроконтактным способом. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022612108, 08.02.2022. Заявка № 2022611352 от 02.02.2022.

115. Сызранцев, Д. В. Техническая разработка совершенствования технологического оборудования в интересах лечебного питания в полевых условиях / Д. В. Сызранцев // В сборнике: Актуальные вопросы материально-технического обеспечения войск национальной гвардии Российской Федерации. Сборник научных статей X Всероссийской научно-практической конференции. – Пермь, – 2022. – С. 319-323.

116. Сызранцев, Д. В. Инновационные подходы в совершенствовании производства лечебно-профилактического питания / Г. В. Алексеев, Д. В. Сызранцев, К. С. Лях // В сборнике: Современные проблемы

цивилизации и устойчивого развития в информационном обществе. Сборник материалов X Международной научно-практической конференции. Редколлегия: Л.К. Гуриева, З.Ш. Бабаева [и др.]. – М.: – 2022. – С. 170-174.

117. Сызранцев, Д. В., Топоров, А. В. и др. Математическая модель приготовления пищи в полевом пароварочном аппарате. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022615311, 30.03.2022. Заявка № 2022614623 от 23.03.2022.

118. Сызранцев, Д. В. Методика обоснования основных конструктивных элементов конвейерной хлебопекарной печи и её эксплуатационных характеристик / Д. В. Сызранцев // Хлебопродукты. – 2023. – № 8. – С. 49-53. DOI: 10.32462/0235-2508-2023-32-8-49-53.

119. Сызранцев, Д. В., и др. Обогащение теста измельченными пищевыми добавками с использованием механизма кавитации / Д. В. Сызранцев, Е. Н. Ивлева, Г. В. Алексеев // Исследование различных направлений современной науки: естественные и технические науки. Сборник материалов XXVIII международной очно-заочной научно-практической конференции (17 мая 2023 г.). – М.: Издательство НИЦ «Империя», – 2023. – С. 37-38.

120. Сызранцев, Д. В., и др. Обоснование эксплуатационных характеристик технологического оборудования для производства функционального хлеба / С. А. Романчиков, Е. В. Уточкин, Д. В. Сызранцев // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В.Хрулева. – 2023. – № 1 (33). – С. 74-79.

121. Сызранцев, Д. В. Оценка показателей качества продовольствия используемого для организации лечебного питания в полевых условиях / Д. В. Сызранцев // Тыловое обеспечение войск национальной гвардии Российской Федерации на современном этапе развития. Сборник научных статей XIII научно-практической конференции с международным участием. – Пермь, – 2023. – С. 370-374.

122. Сызранцев, Д. В. Предложения по совершенствованию лечебного питания военнослужащих в полевых условиях / Д. В. Сызранцев // В сборнике: Материалы итоговой конференции Военно-научного общества курсантов, студентов и слушателей Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова. Материалы конференции. – СПб.: – 2024. – С. 658-663.

123. Сызранцев, Д. В., и др. Регулирование режимов электроконтактной выпечки для компенсации упека тестозаготовок / Г. В. Алексеев, А. П. Савельев, Д. В. Сызранцев, Е. Н. Ивлева // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 31-36. DOI: 10.25712/АСТУ.2072-8921.2023.02.004.

124. Сызранцев, Д. В., и др. Ресурсосбережение как основа совершенствования процессов переработки пищевого сырья / А. Г. Леу, Д. В. Сызранцев // Молодые исследователи в ответ на современные вызовы. Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса (29 августа 2022 года, г. Петрозаводск). Петрозаводск, – 2022. – С. 8-19.

125. Сызранцев, Д. В., и др. Совершенствование процесса извлечения пектина из топинамбура / И. Ж. Искаков, В. Я. Кучеренко, Г. В. Алексеев, К. С. Лях, Д. В. Сызранцев // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2022. – № 3. – С. 223-231. DOI: 10.24412/2311-6447-2022-3-223-231.

126. Сызранцев, Д. В. Совершенствование процессов и аппаратов для обеспечения функциональным питанием компактных групп населения в обособленных условиях проживания. Автореферат дисс. на соискание ученой степени к.т.н. СПб.: ВАМТО. 2024. – 24 с.

127. Сызранцев, Д. В. Технология электроконтактной выпечки хлеба в особых условиях / Д. В. Сызранцев // Хлебопродукты. – № 10. – 2025. – С. 51-55. DOI: 10.32462/0235-2508-2025-34-10-51-56.

128. Сызранцев, Д. В., и др. Экологическая безопасность производства продуктов функционального назначения на предприятиях АПК / Д. В. Сызранцев, Е. Н. Ивлева, М. А. Новикова // Технологии, машины

и оборудование для проектирования, строительства объектов АПК. Сборник научных статей Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров (15 марта 2023 г., г. Курск). – Курск, – 2023. – С. 368-371.

129. Тутельян, В. А., и др. Стратегия научного обеспечения реализации государственной политики в области оптимизации питания населения / В. А. Тутельян, Д. Б. Никитюк, И. Ю. Тармаева, А. В. Погожева // Российский вестник гигиены. 2025. № 1. – С. 47-52.

130. Тутельян В.А. Современные приоритеты науки о питании / В.А. Тутельян // Вопросы питания. – 1994. – № 3. – С. 10-15.

131. Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года».

132. Хатко, З. Н. Разработка технологии комплексной переработки топиамбура / Хатко З. Н., Блягоз А. И. // Новые технологии Том. 19. – № 4, –2023. – С. 56-62.

133. Хачатурян, Э. Е., Гвасалия, Т. С., Якименко, Т. П. Двести составляющих реакции меланоидинообразования / Э. Е. Хачатурян, Т. С. Гвасалия, Т. П. Якименко // Современная наука и инновации. – 2014. – № 4. – С 22-23.

134. Цветков, О. Б. Термодинамика. Теплопередача: Справочное пособие/ Цветков О. Б., Лаптев Ю.А.- 2. изд., исправл. – СПб.: СПбГУНиПТ, – 2008. – 41 с.

135. Цыганова, Т. Б. Технология хлебопекарного производства. – М.: ИРПО; Издательский центр «Академия», – 2001. – 432 с.

136. Федоров, А. В. Использование вторичных ресурсов в хлебопечении – как способ достижения целей устойчивого развития / А. В. Федоров, М. В. Шабунина, Н. В. Баракова // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. – 2021. – № 1-2. – С. 18-24.

137. Шаронов, А. Н., Шаронов, Е. А. Тактико-технические требования к разрабатываемым образцам технических средств// Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2020. – № 6 (7). – С. 51-64.

138. Шевелева, Г. И. Разработка способов повышения витаминной ценности хлебобулочных изделий. Дис. ... канд. тех. наук. / Г. И. Шевелева. – М.: – 1992. – 178 с.

139. Шумаев, Ф. Г. Промышленные печи хлебопекарного и кондитерского производства [Учебник для технол. вузов пищевой промышленности] / Ф. Г. Шумаев, И. И. Маклюков. – М.: Пищепромиздат, 1957. – 354 с.

140. Юхник, И. П. Наука и практика ресурсосберегающего использования зернового сырья совершенствованием его подготовки и переработки в пищевые продукты: диссертация ... к.т.н.: 05.18.12, – СПб.: – 2020. – 166 с.

141. Яковлев, А. А. Совершенствование баромембранного разделения молочной сыворотки путем интенсификации диффузионных процессов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.18.12 / Яковлев Алексей Александрович; [Место защиты: СПб.: гос. ун-т низкотемператур. и пищевых технологий]. – СПб.: – 2011. – 112 с.

142. Ялалетдинова, Д. И. Разработка технологии зернового хлеба с применением электроконтактного способа выпечки: диссертация ... кандидата технических наук : 05.18.01. / Ялалетдинова Дина Ильдаровна; [Место защиты: Моск. гос. ун-т технологий и упр.]. – М.: – 2010. – 262 с.

143. Ялалетдинова, Д. И., Сидоренко, Г. А., Попов В. П. Применение электроконтактного энергопровода для выпечки зернового хлеба // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2009. – № 2. – С. 23-26.

144. Хачатурян, Э. Е., Гвасалия Т. С., Якименко Т. П. Двести составляющих реакции меланоидинообразования / Э. Е. Хачатурян, Т. С. Гвасалия, Т. П. Якименко // Современная наука и инновации. – 2014. (4). – С. 22-32.

145. Baker, J. C. Method and apparatus for testing dough / J. C. Baker // *Cereal Chemistry*. – 1939. – v. 25. – № 4. – P. 38–42.
146. Baker, J. C. Effect of temperature on dough properties I. / J. C. Baker, M. D. Mize // *Cereal Chemistry*. – 1939. – V. 26. – № 4. – P. 76–81.
147. Baskar, G. Overview on mitigation of acrylamide in starchy fried and baked foods / G. Baskar, R. Aiswarya// *Journal Sci. Food Agric.* – 2018. – V. 98. – № 12. – P. 4385–4391.
148. Breitbach, M. Influence of ultrasound on adsorption processes /M. Breitbach, D. Bathen// *UltrasonicsSonochemistry*. 2001. – Vol. 8, № 3. – P. 277-283.
149. Bertuzzi, T. Mitigation measures for acrylamide reduction in dough-based potato snacks during their expansion by frying / T. Bertuzzi [et al.] // *Food Additives & Contaminants: Part A*. – 2018. – V. 35. – № 10. – P. 1940–1946.
150. Butt, M. S. Xylanases and Their Applications in Baking Industry / M.S. Butt [et al.] // *Food Technol. Biotechnol.* – 2008. – V. 46. – № – P. 22–31.
151. Danilcenko, H., Jariene, E., Slepetiene, A., Sawicka, B., Zaldariene, S. The distribution of bioactive compounds in the tubers of organically grown Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) during the growing period. *ActaSci. Pol. HortorumCultus*. 2017.
152. Davies, R. Observations on the use of ultrasound waves for the disruption of microorganisms /R. Davies// *J. Bacteriol.* 1959. - № 33. – P. 481-493.
153. Delgado-Andrade, C. Maillard reaction products: some considerations on their health effects / C. Delgado-Andrade // *Clin. Chem. Lab. Med.* – 2014. – V. 5 – № 1. – P. 53–60.
154. Eller, S. A. Straightened diffusion in ultrasonic field / S. A. Eller, H. G. Flynn // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1967. – Vol. 37, № 3. – P. 493-503.
155. Elpiner, I. E. Ultrasound: Physical, Chemical, and Biological Effects / I. E. Elpiner // *Consultants Bureau*. New York, 1964. – P. 53-78.

156. Gertis, L. R. Lipases and Their Functionality in the Production of Wheat-Based Food Systems / L. R. Gertis [et al.] // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. – 2014. – V. 13. – № 5. – P. 978–984.
157. Novikova, M. A. Intensification of the wastewater treatment process for its secondary use in food enterprises / M. A. Novikova, D. V. Syzrancev, G. V. Alekseev // *Modern Science and Innovations*. 2023. № 2 (42). С. 95-101.
158. Hickling R. Shock wave at slammed of cavitational bubble / R. Hickling, M.S. Plesset // *Phys. Fluids*. 1964. – Vol. 7, № 1. – P. 7-14.
159. Kaszás, L., Kovács, Z., Nagy, E., Elhawat, N., Abdalla, N., Domokos-Szabolcsy E. Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L) as a potential chlorophyll source for humans and animals nutrition. *Environ. Biodivers. Soil Secur*. 2018.
160. Lund, M. N. Control of Maillard Reactions in Foods: Strategies and Chemical Mechanisms / M. N. Lund, C. A. Ray // *Agric. Food Chem*. – 2017. – V. 65. – № 23. – P. 4537–4552.
161. Vacuum cooling technology for the food processing industry / McDonald Karl, Sun DaWen. // *J. Food Eng*. – 2000. – 45. – № 2. – P. 5 5 455.
162. Van Wambeke E. Ultrasonic antifungal treatment of crop nutrient solutions / Van Wambeke E., Van Reet J., Vanachter A., Van Assche C. // *Meded. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent*. 1985. – Vol. 50, № 3. – P. 1081-1086.
163. Wang, Y., Zhao, Y., Xue, F., Nan, X., Wang, H., Hua, D., Liu, J., Yang, L., Jiang, L., Xiong B. Nutritional value, bioactivity, and application potential of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) as a neotype feed resource. *Anim. Nutr*. 2020.
164. Zononi, B. Effect of moisture and temperature on the Specific heat of Bread / B. Zononi, M. Petronio // *Ital. J. Food Sci*. – 1991. – №3. – P. 239-242.

## **Приложение А**

(рекомендуемое)

### **Влияние инфракрасного излучения на процесс приготовления продуктов питания**

Инфракрасный нагрев в пищевой промышленности применяют для интенсификации технологических процессов выпечки, сушки, обжарки, копчения и для стимуляции биохимических процессов.

Инфракрасное излучение используется главным образом для нагревания продукта. Сравнительно с традиционными источниками инфракрасное излучение имеет следующие особенности. Так же как и при кондуктивном нагреве, с помощью инфракрасного излучения можно передавать продукту мощный поток тепла. Однако в отличие от кондуктивного нагрева инфракрасное излучение проникает на некоторую глубину, которая при коротковолновом инфра-красном излучении может составлять несколько миллиметров. Благодаря проникновению инфракрасного излучения вглубь продукта мощность потока тепла может быть много выше без опасности перегрева поверхности продукта.

В отличие от кондуктивного нагрева, при нагреве инфракрасным излучением поверхность продукта остается открытой, с нее идет интенсивное испарение воды, вызывающее охлаждение поверхностных слоев. Это также дает возможность подводить к продукту интенсивный поток тепла - до тех пор, пока поверхностные слои не будут чрезмерно обезвожены.

Сравнительно с конвективным нагревом, с помощью инфракрасного излучения также можно вести процесс нагрева значительно более интенсивно. При конвективном нагреве в горячей газовой среде основной поток тепла воспринимается продуктом через теплоотдачу. Известно, что коэффициент теплоотдачи находится в степенной зависимости со скоростью

движения теплоносителя. Так что интенсификация процесса нагрева при конвективном способе достигается повышением температуры теплоносителя и скорости его движения. Для существенной интенсификации нагрева продукта необходимо значительно увеличить скорость движения теплоносителя, но при этом происходит быстрое обезвоживание поверхности продукта, что в большинстве случаев приводит или к порче продукта, или к чрезмерным потерям его массы.

Нагрев инфракрасным излучением осуществляется следующим образом. Направленный поток инфракрасного излучения взаимодействует с поверхностными слоями продукта, преобразуясь в теплоту. В зависимости от оптических свойств продукта и длины волны излучения последняя проникает в поверхностные слои продукта. Такая мобильность инфракрасного излучения открывает широкие возможности для его использования.

Инфракрасное излучение в спектре электромагнитных волн условно делятся на три группы: длинноволновое – 9 мкм; средневолновое – 5 мкм; коротковолновое – 2,5 - 0,76 мкм.

Для технических целей верхний предел используемых длин волн можно ограничить 15 мкм.

Отличительной особенностью рационального подвода теплоты является прямолинейное распространение излучения. Это надо учитывать при размещении излучателей в аппарате. Они должны размещаться в соответствии с формой обрабатываемого изделия и особенностями технологического процесса.

Продукт с большой проницаемостью в инфракрасной области лучше размещать на горизонтальной конвейерной ленте, изготовленной из металла. Нагреваясь, лента в свою очередь передает тепло продукту.

Если допускает форма, то целесообразно облучать продукт со всех сторон.

Расположение излучателей с четырех сторон продукта приводит к увеличению потерь энергии за счет отражения от поверхности, однако при

значительной шероховатости продукта в результате многократных отражений величина потерь несколько снижается.

Определенные требования предъявляют к конструктивному использованию аппаратов ИК-излучения.

## Приложение Б

(справочное)

### Копии актов внедрения и реализации

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ООО «Алгоритм»  
Е.В. Коновалова  
«12» декабря 2023 г.  
АКТ № \_\_\_\_\_



о внедрении технического решения «Месильная камера для замеса теста в месильно-сбивальной машине» в ООО «Алгоритм» от «12» декабря 2023 г.

Настоящий акт составлен в том, что вышеуказанное техническое решение «Месильная камера для замеса теста в месильно-сбивальной машине» (Пат. 216005 Российская Федерация, А21С 1/06, Месильная камера для замеса теста в месильно-сбивальной машине [Текст]/ заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева" Министерства обороны Российской Федерации (RU) – № 2022114155, приор. 25.05.2022; опубл. 12.01.2023; Бюл. № 2) разработанное Сызранцевым Д.В. в рамках выполнения им диссертационного исследования внедрено в техническую документацию ООО «Алгоритм» на разработку перспективного технологического оборудования производства хлеба в полевых условиях. В соответствии с этой документацией изготовлен опытный образец.

Внедрение технического решение обеспечивает повышение показателей качества теста при внесении в него обогащающих ингредиентов.

Комиссия подтверждает, что техническое решение, разработанное Сызранцевым Д.В., внедрено в производство ООО «Алгоритм» и имеет важное государственное значение для реализации государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (утвержденная постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 328 (с изменениями утвержденными постановлением Правительства РФ от 31.03.2017 г. № 328-13)).

Конструктор



А. Соловьев

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ООО «Проектинтертехника»  
А.А. Лоза  
«23» июля 2024 г.

АКТ № 2/пнт

реализации научных положений и выводов диссертации Сызранцева Дмитрия Викторовича на тему: «Модернизация аппаратного обеспечения производства обогащенного хлеба в особых условиях».

Комиссия в составе: председателя комиссии – заместителя генерального директора Д.А. Обанина, и начальника отдела С.С. Рубцова, составили настоящий акт о том, что следующие результаты работы Сызранцева Д.В. использованы (реализованы) в ходе подготовки предложений по модернизации технологического оборудования для приготовления пищи в ограниченных пространствах:

- 1) математическая модель модернизированной рамной мешалки электромагнитного и акустического действия для производства обогащенных белково-жировых эмульсий;
- 2) математическая модель модернизированной пекарной камеры электромагнитного и акустического действия для выпечки обогащенного хлеба в особых условиях.

Научное исследование, выполненное Сызранцевым Д.В., отмечается актуальностью, важностью, новизной поставленных вопросов и методами их решения.

Результаты исследования Сызранцева Д.В., считать реализованными в ходе подготовки предложений по модернизации технологического оборудования для приготовления пищи в ограниченных пространствах.

Комиссия подтверждает, что разработанные Д.В. Сызранцевым положения имеют важное государственное значение для реализации «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации», (указ Президента РФ от 02.07.2021 г. № 400), государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (утвержденная постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 328 (с изменениями утвержденными постановлением Правительства РФ от 31.03.2017 г. № 328-13)).

Заместитель генерального директора –

Начальник отдела


Обанин Д.А.

Рубцов С.С.

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ООО «Брасовские сыры»  
А.В. Беленчиков

«15» февраля 2025 г.



### АКТ № \_

реализации научных положений и выводов диссертации Сызранцева Дмитрия Викторовича на тему: «Модернизация аппаратного обеспечения производства обогащенного хлеба в особых условиях».

Комиссия в составе: председателя комиссии – заместителя исполнительного директора Т. Землянской, главного инженера А. Манина и главного технолога Н. Гайдукевича, составили настоящий акт о том, что следующие результаты исследования Сызранцева Д.В. использованы (реализованы) в ходе разработки технологического оборудования для производства обогащенного хлеба:

- 1) кластеризация проблем модернизации технологических процессов производства полноценных продуктов питания в особых условиях;
- 2) обоснование технических характеристик модернизированного аппаратного обеспечения электромагнитного действия производства обогащенного хлеба в особых условиях;
- 3) оценка технико-экономической эффективности модернизированного аппаратного обеспечения электромагнитного действия производства обогащенного хлеба в особых условиях.

Научное исследование, выполненное Сызранцевым Д.В., отмечается актуальностью, важностью, новизной поставленных вопросов и методами их решения.

Результаты исследования Сызранцева Д.В., считать реализованными в ходе разработки технологического оборудования для производства обогащенного хлеба.

Заместитель исполняющего директора –

Главный инженер

Главный технолог

Т. Землянская

А. Манин

Н. Гайдукевич

## Приложение В

(справочное)

### Копия ТУ на хлеб и хлебобулочные изделия

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
«ЗДОРОВЫЙ ХЛЕБ»

ОКПД2 10.72.19.110

Группа Н 32  
(ОКС 67.060)

УТВЕРЖДАЮ:  
Генеральный директор  
ООО «Здоровый Хлеб»



В.В. Долгих

02 Августа 2024 г.

### ХЛЕБ И БУЛОЧНЫЕ ИЗДЕЛИЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ

Технические условия

ТУ 10.72.19 – 001 – 22052233 – 2019  
(редакция №1)

Дата введения в действия: 02 Августа 2024г  
Количество листов: 16 листов

РАЗРАБОТАНО:  
ООО «Здоровый Хлеб»

Санкт-Петербург  
2019 г.

Т а б л и ц а 1

| Наименование показателя (характеристики)                       | Содержание характеристики                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Внешний вид:<br>форма<br><br>поверхность<br><br>цвет           | Соответствующая форме для выпечки (формовой или подовый), не расплывчатая, без притисков.<br>Без крупных подрывов. Допускаются наколы, надрезы, трещины, мучнистость верхней и нижней корок.<br>От светло-коричневого до темно-коричневого цвета.<br>Не допускается подгорелость |
| Состояние мякиша:<br>пропеченность<br><br>промес<br>пористость | Пропеченный, не влажный на ощупь. Допускается небольшая липкость.<br>Без комочков и следов непромеса.<br>Развитая, без пустот и уплотнений. В изделиях допускаются различные включения (семена, зерна, ягоды и другое), предусмотренные рецептурой.                              |
| Вкус                                                           | Свойственный данному виду хлебобулочного изделия, хлеба или изделия булочного, без постороннего привкуса                                                                                                                                                                         |
| Запах                                                          | Свойственный данному виду хлебобулочного изделия, хлеба или изделия булочного, без постороннего запаха                                                                                                                                                                           |

2.3 По физико-химическим показателям хлебобулочные изделия, хлеб и изделия булочные должны соответствовать требованиям, приведенным в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

| Наименование показателей           | Значение показателей |
|------------------------------------|----------------------|
| Влажность мякиша, %, не более      | 49,5                 |
| Кислотность мякиша, град, не более | 8,0                  |
| Пористость мякиша, %, не менее     | 59,0                 |

Примечание: пористость определяется только в изделиях массой не менее 6,2 кг, в состав которых не включены зерновые продукты, сушеный виноград, клюква.

2.4 В хлебобулочные изделия, хлебе и изделиях булочных не допускаются посторонние включения, хруст от минеральной примеси, признаки болезней хлеба и плесени.

2.5 Содержание токсичных элементов, микотоксинов, пестицидов и радионуклидов в хлебобулочных изделиях, хлебе и изделиях булочных не должно превышать допустимые уровни, установленные Техническим регла-