

**ISSN 2073-3569**

# **ХЛЕБОПЕЧЕНИЕ РОССИИ**

# **BAKERY OF RUSSIA**

**2024**

**№ 1**

## **Главный редактор журнала**

Битус Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и инжиниринга технических систем, Российский биотехнологический университет, Москва, Россия.

## **Заместитель главного редактора**

Омельченко Олег Михайлович – кандидат экономических наук, доцент, директор центра коммерциализации и трансфера технологий, Российский биотехнологический университет, Почётный Пекарь России, Москва, Россия.

## **Выпускающий редактор**

Забайкин Юрий Васильевич – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия.

## **Редакционная коллегия**

Алехина Надежда Николаевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Белявская Ирина Георгиевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия.

Березина Наталья Александровна – доктор технических наук, доцент, проректор по цифровизации, научной и инновационной деятельности, Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, Орел, Россия.

Ильина Ольга Александровна – доктор технических наук, профессор, ректор, Международная промышленная академия, Москва, Россия.

Жаркова Ирина Михайловна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Жиров Михаил Вениаминович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной автоматики, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Казарцев Дмитрий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии виноделия, бродильных производств и химии им. Г.Г. Агабальянца, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Краснов Андрей Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Краус Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Ирек», вице-президент Российского союза пекарей, председатель правления Союза производителей пищевых ингредиентов, председатель рабочей группы по аграрной и пищевой промышленности при Российско-Германской внешнеторговой палате, Барнаул, Россия.

Магомедов Газибег Омарович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Макаров Сергей Васильевич – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии пищевых продуктов и биотехнологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия.

Налиухин Алексей Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры агрономической, биологической химии и радиологии, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

Никитин Игорь Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биотехнологий продуктов питания из растительного и животного сырья, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Пономарева Елена Ивановна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Росляков Юрий Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пищевой инженерии, Кубанский государственный технический университет, Краснодар, Россия.

## СОДЕРЖАНИЕ

Константин Сергеевич Глумов Шаблоны, лежащие в основе java, kubernetes и современных распределенных систем	6
Юрий Васильевич Забайкин Применение технологий компьютерного зрения для контроля доступности хлебулочных изделий на полках в режиме реального времени	13
Чжан Чэнь Применение автоматизированных систем управления для оптимизации процессов хлебопечения на промышленных предприятиях	23
Артем Валерьевич Яицких, Людмила Витальевна Ванина, Антонина Сергеевна Цыгаркина Методы определения кислотного числа жира зерна и продуктов его переработки	34
Илья Вадимович Самарин Подходы к модернизации энергетической промышленности для обеспечения развития цифровой экономики	45
Алексей Владимирович Лялин, Олег Алексеевич Феськов, Алла Николаевна Стрелюхина, Жанна Викторовна Новикова Исследование параметров процесса замораживания тестовых заготовок и хлебулочных изделий различной степени готовности	63
Юрий Васильевич Забайкин Внедрение энергоэффективных технологий в животноводческом комплексе	78
Светлана Николаевна Коломиец, Наталья Сергеевна Жильцова, Ольга Ивановна Бундина Органолептическая оценка овсяной каши быстрого приготовления	92
Илья Вадимович Самарин Исследование влияния динамических препятствий на эффективность методов локализации в автономных мобильных роботах	98
Иван Александрович Кечкин Сортовой способ получения пшенично-льняной муки	110

## CONTENTS

Konstantin S. Glumov The patterns underlying java, kubernetes, and modern distributed systems	6
Yuri V. Zabaykin The use of computer vision technologies to monitor the availability of bakery products on shelves in real time	13
Zhang Chen The use of automated control systems to optimize baking processes in industrial enterprises	23
Artyom V. Yaitskikh, Lyudmila V. Vanina, Antonina S. Tsygarkina Methods for determining the acid number of grain fat and its processed products	34
Ilya V. Samarin Approaches to the modernization of the energy industry to ensure the development of the digital economy	45
Alexey V. Lyalin, Oleg A. Feskov, Alla N. Strelyukhina, Zhanna V. Novikova Investigation of the parameters of the freezing process of dough blanks and bakery products of various degrees of readiness	63
Yuri V. Zabaykin The introduction of energy-efficient technologies in the livestock sector	78
Svetlana N. Kolomiets, Natalia S. Zhiltsova, Olga I. Bundina Organoleptic evaluation of instant oatmeal	92
Ilya V. Samarin Investigation of the influence of dynamic obstacles on the effectiveness of localization methods in autonomous mobile robots	98
Ivan A. Kechkin Varietal method for producing wheat and flaxseed flour	110

## Шаблоны, лежащие в основе java, kubernetes и современных распределенных систем

**Константин Сергеевич Глумов**

Инженер-программист

Альфа-Банк

Москва, Россия

glumovk@gmail.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 07.11.2023

Принята 28.12.2023

Опубликована 15.03.2024

УДК 34.13.30.150

EDN FTRGFN

BAK 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

### Аннотация

Статья посвящена исследованию шаблонов, лежащих в основе java, kubernetes и современных распределенных систем. Автор обосновывает актуальность и значимость темы исследования. Постулируется о том, что в настоящее время, шаблоны, лежащие в основе java, kubernetes и современных распределенных систем представляет собой широко распространенную платформу управления контейнерами, которая упрощает развертывание, масштабирование и управление контейнерными приложениями. Анализ научной литературы позволил заключить о том, что шаблоны – это один из самых популярных архитектурных стилей для создания облачных приложений. Они решают проблему сложности программного обеспечения за счет модульности бизнес-возможностей и замены сложности разработки эксплуатации. Вот почему ключевым условием успешного использования микросервисов является создание приложений, которые могут масштабироваться с помощью Kubernetes. Заключается о необходимости дальнейшего изучения вопроса.

### Ключевые слова

шаблоны, программирование, java, kubernetes, распределенные системы, J2EE, Spring Framework, Scala, Kotlin, облачные приложения.

### Введение

Как известно, традиционное объектно-ориентированное или императивное программирование сосредоточено на использовании инструкций для изменения состояния программы. С другой стороны, декларативное или функциональное программирование фокусируется на том, чего должна выполнять программа, и не беспокоится о том, как достигается этот результат, вот почему называется программированием с отслеживанием состояния.

В этой статье опишем функциональное программирование как утверждение о взаимосвязи между первой частью задачи и остальной частью задачи.

### Материалы и методы исследования

Как известно, более 20 лет назад Java пошла в широкие программистские массы, чтобы в итоге стать одним из тех стержней, вокруг которых строятся стеки приложений. Однако на сегодняшний день многие люди и организации переходят на платформу Kubernetes с набором встроенных контроллеров, которые по умолчанию устанавливаются в каждое окружение платформы. Этот по-настоящему

ориентированный на STEM мозг распознает ряд шаблонов, которые управляют современными вычислениями.

Однако анализ современного опыта позволяет сделать вывод о том, что Java все еще растет. Именно инновации фреймворков и открытого исходного кода, выводящие Java за рамки J2EE, придали Java новую энергию, что говорит о важности базовой технологии и ее расширяемости.

Spring Framework изменил Java к лучшему, и это показывает непреходящую ценность глубокого ядра с расширениями, которые служат способом распространения инноваций по всему миру. Сегодня, как и вчера, важно ядро Java, но именно Spring Framework с открытым исходным кодом предлагает новые возможности. Более того, Java стала больше, чем просто языком, а Kubernetes – больше, чем просто контейнерным оркестратором. Эти инструменты с открытым исходным кодом стали платформой платформ, которые управляют шаблонами, поддерживающими новый опыт разработчиков.

Именно этот шаблон базовых технологий, фреймворков и открытого исходного кода служит основой для Kubernetes и потребности в высокораспределенных системах. В этой статье рассмотрим его детальнее.

### Результаты и обсуждение

Spring Framework предоставляет собой комплексную модель программирования и настройки для современных корпоративных приложений на базе Java – на любой платформе развертывания. Ключевым элементом Spring является инфраструктурная поддержка на уровне приложений: Spring фокусируется на «настройке» корпоративных приложений, чтобы команды могли сосредоточиться на бизнес-логике на уровне приложений без ненужных привязок к конкретным средам развертывания. Кстати, то же относится к Scala, но Kotlin.

Scala и новые языки, такие как Kotlin, приобрели значимость, потому что это, прежде всего, функциональные языки, более выразительные, чем предписывающие. Следует согласиться с мнением К. Дэвис о том, что популярность Kotlin заключается в том, что это «в первую очередь функциональный язык программирования, который основан на математических функциях, предназначенных для обработки символьных вычислений и приложений обработки списков» (Davis, 2019).

В настоящее время языки предназначены для нового мира распределенных систем, которые должны полагаться на глубокие технические возможности распределенных архитектур.

Так, известно, что с помощью Kubernetes разработчики могут создавать облачные приложения, используя библиотеку интерфейсов прикладного программирования (API), а также инструменты для создания приложений. К. Дэвис отмечает, что переход к облачным приложениям приводит к появлению шаблонов, с которыми должен быть знаком каждый. Среди них шаблоны:

- автоматического отключения – обертывание монитора, отслеживающего сбой;
- обнаружения сервисов – автоматическое обнаружение сервисов и устройств;
- повторных попыток – повторные попытки после кратковременной потери сети.

Поясним. Шаблоны – это способ повторного использования архитектур. Вместо того чтобы создавать сквозную архитектуру самостоятельно, можно использовать существующие шаблоны Kubernetes и, таким образом, убедиться, что все элементы будут работать должным образом. Отметим, что первоначально разработанная Kubernetes была платформой оркестровки контейнеров с открытым исходным кодом, предназначенной для автоматизации развертывания, масштабируемости и управления контейнерными приложениями. Фактически, Kubernetes де-факто стал стандартом для оркестровки контейнеров и является флагманским проектом Cloud Native Computing Foundation (CNCF), поддерживаемым такими крупными игроками, как Google, AWS, Microsoft, IBM, Intel, Cisco, и Red Hat. На рисунке 1 показано сочетание навыков, необходимых для создания хороших облачных приложений, и показано, как подходят шаблоны Kubernetes.



Рисунок 1. Путь к облачной среде. Использовано с разрешения Kubernetes

Kubernetes работает на архитектуре клиент-сервер, включающей плоскость управления и набор узлов, на которых запускаются контейнеры.

Заметим, что использование многоконтейнерных модулей в Kubernetes позволяет улучшить совместную работу и совместное использование ресурсов между контейнерами в рамках одного модуля. Рассмотрим некоторые фрагменты кода, демонстрирующие различные шаблоны работы с несколькими контейнерами: шаблон Sidecar (рис. 2); шаблон Ambassador (рис. 3); шаблон адаптера (рис. 4).

```
01 | apiVersion: v1
02 | kind: Pod
03 | metadata:
04 |   name: multi-container-pod
05 | spec:
06 |   containers:
07 |     - name: main-container
08 |       image: main-image:latest
09 |       ports:
10 |         - containerPort: 80
11 |     - name: sidecar-container
12 |       image: sidecar-image:latest
```

Рисунок 2. Шаблон Sidecar

Контейнер sidecar работает параллельно с контейнером основного приложения, предоставляя дополнительные функциональные возможности без изменения основного приложения.

```
01 | apiVersion: v1
02 | kind: Pod
03 | metadata:
04 |   name: ambassador-pod
05 | spec:
06 |   containers:
07 |     - name: main-container
08 |       image: main-image:latest
09 |       ports:
10 |         - containerPort: 80
11 |     - name: ambassador-container
12 |       image: ambassador-image:latest
13 |       ports:
14 |         - containerPort: 8080
```

Рисунок 3. Шаблон Ambassador

В этом шаблоне контейнер ambassador действует как посредник, обрабатывая коммуникационные и сетевые задачи от имени основного приложения. Контейнер-адаптер преобразует или адаптирует данные до того, как они попадут в основное приложение, обеспечивая плавную точку интеграции.

```
01 | apiVersion: v1
02 | kind: Pod
03 | metadata:
04 |   name: adapter-pod
05 | spec:
06 |   containers:
07 |     - name: main-container
08 |       image: main-image:latest
09 |       ports:
10 |         - containerPort: 80
11 |     - name: adapter-container
12 |       image: adapter-image:latest
13 |       ports:
14 |         - containerPort: 9090
```

Рисунок 4. Шаблон адаптера

Так, Kubernetes упрощает развертывание и эксплуатацию приложений в архитектуре микросервисов. Таким образом, группы разработчиков могут развертывать свои приложения и поручать Kubernetes управление следующими элементами:

- контроль потребления ресурсов приложением или командой;
- равномерное распределение нагрузки приложений на инфраструктуру хоста;
- автоматическая балансировка нагрузки запросов на разных экземплярах приложения;
- мониторинг потребления ресурсов и ограничений для автоматического выключения и перезапуска приложений, которые потребляют слишком много ресурсов;
- перемещение экземпляра приложения с одного хоста на другой в случае нехватки ресурсов на хосте или в случае его смерти;
- автоматическая мобилизация дополнительных ресурсов, которые становятся доступными при добавлении нового хоста в кластер.

В этой связи отметим, что шаблоны – это инструменты, необходимые разработчикам Kubernetes. Они рассказывают им, как создать систему:

1. Базовые шаблоны охватывают фундаментальные концепции Kubernetes. Они представляют основные принципы и методы, которые необходимо применять для создания облачных приложений на основе контейнеров.
2. Поведенческие модели располагаются поверх базовых моделей и дополнительно детализируют концепции, позволяя управлять многими типами взаимодействий между контейнерами и платформами.
3. Структурные шаблоны позволяют упорядочивать контейнеры в модуле Kubernetes.
4. Шаблоны конфигурации используются для управления множеством способов настройки приложения в Kubernetes. Они включают в себя шаги, необходимые для подключения приложений к их настройке.
5. Расширенные шаблоны предназначены для расширенных концепций, таких как способы расширения платформы или создания образов контейнеров непосредственно в кластере.

Шаблоны Kubernetes представляют многообразные шаблоны и принципы проектирования и реализации облачных приложений на Kubernetes, к примеру Red Hat® OpenShift® – это платформа Kubernetes, разработанная для предприятий. Он предлагает разработчикам среды самообслуживания для создания приложений, а также функции для автоматизации работы всего стека на любом типе инфраструктуры (Hass, 2020).

Red Hat OpenShift включает в себя множество дополнительных технологий, которые делают Kubernetes мощным и жизнеспособным инструментом для бизнеса, в том числе: ведение реестра, сетевое взаимодействие, телеметрию, безопасность, автоматизацию и услуги.

С помощью Red Hat OpenShift разработчики могут создавать контейнерные приложения, размещать их и развертывать в облаке, обеспечивая при этом эффективную масштабируемость, контроль и организацию, чтобы идеи могли быстро стать реальностью. Облачные технологии базируются на виртуальном ПО, объединяющем ресурсы нескольких серверов. Вследствие этого, по сути – это новая технологическая парадигма. Если, например, в традиционной корпоративной IT-среде нужно будет сделать сервер нового приложения, на это может уйти не одна неделя времени. Ведь нужно купить новый сервер, затем перенастроить все ПО именно под него. Когда же речь идет об облачной среде, то в ней объем сервера виртуален. В результате и настроить, и запустить его в работу можно буквально за несколько минут. А приложения с такого сервера запускаются вообще практически на автомате. При этом в данном случае клиент оплачивает лишь то виртуальное пространство, которым действительно пользуется (в случае с традиционным сервером нужно платить за весь его объем). Возможности облачных технологий действительно безграничны, а сервисы – многообразны. Здесь можно просто хранить какие-то данные, а можно при необходимости использовать в собственных целях самые сложные и притом безопасные IT-структуры.

### **Заключение**

Вышесказанное позволяет сделать объективное заключение о том, что Kubernetes несомненно развивался в течение всего времени своего существования. Однако такой быстрый рост также иногда приводит к трудностям. Хотя разработчики любят технологии с открытым исходным кодом, такие как Kubernetes, за потенциальную скорость предлагаемых ими инноваций, иногда бывает также, что слишком много инноваций создает некоторую путаницу (особенно когда код Kubernetes Central работает быстрее, чем пользователи успевают за его разработкой). Однако, все же, разработчики изо дня в день, используют все больше примитивных типов данных в Java и со временем эти новые примитивы порождают новые способы решения проблем, и некоторые из этих повторяющихся решений становятся шаблонами. Таким образом, шаблоны значительно упрощают жизнь Java-разработчику при работе с Kubernetes.

### Список литературы

1. Academy, F. How is Java different from other Programming Languages? (FITA Academy Student Video Review, 2021), <https://www.fita.in/how-java-is-different-from-other-programming-languages/>
2. Davis C. Cloud Native Patterns. Released May. 2019. 400 p.
3. Everything computer science CS Java. (2016), <https://everythingcomputerscience.com/programming/Java.html>
4. Hachadi, Z. Java Web Development Springboot Security..
5. Hass R., Ibram B. Templates for developing your own cloud applications. 2020. 320 p
6. Interview Bit Major Features of Java Programming Language. (2023), <https://www.interviewbit.com/blog/features-of-java/>

### The patterns underlying java, kubernetes, and modern distributed systems

#### Konstantin S. Glumov

Software Engineer

Alfa-Bank

Moscow, Russia

glumovk@gmail.com

ORCHID 0000-0000-0000-0000

Received 07.11.2023

Accepted 28.12.2023

Published 15.03.2024

UDC 34.13.30.150

EDN FTRGFN

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

#### Abstract

The article is devoted to the study of the patterns underlying java, kubernetes and modern distributed systems. The author substantiates the relevance and significance of the research topic. It is postulated that currently, the patterns underlying java, kubernetes and modern distributed systems represent a widespread container management platform that simplifies the deployment, scaling and management of container applications. An analysis of the scientific literature has led to the conclusion that templates are one of the most popular architectural styles for creating cloud applications. They solve the problem of software complexity by modularizing business capabilities and replacing development complexity with operational complexity. That's why the key to successful use of microservices is to create applications that can scale with Kubernetes. It is about the need for further study of the issue.

#### Keywords

templates, programming, java, kubernetes, distributed systems, J2EE, Spring Framework, Scala, Kotlin, cloud applications.

#### References

1. Academy, F. How is Java different from other Programming Languages? (FITA Academy Student Video Review, 2021), <https://www.fita.in/how-java-is-different-from-other-programming-languages/>
2. Davis C. Cloud Native Patterns. Released May. 2019. 400 p.

3. Everything computer science CS Java. (2016), <https://everythingcomputerscience.com/programming/Java.html>
4. Hachadi, Z. Java Web Development Springboot Security..
5. Hass R., Ibram B. Templates for developing your own cloud applications. 2020. 320 p
6. Interview Bit Major Features of Java Programming Language. (2023), <https://www.interviewbit.com/blog/features-of-java/>

## Применение технологий компьютерного зрения для контроля доступности хлебобулочных изделий на полках в режиме реального времени

**Юрий Васильевич Забайкин**

Кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов  
Российский государственный университет нефти и газа НИУ им. И.М. Губкина

Москва, Россия

79264154444@yandex.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 03.11.2023

Принята 21.12.2023

Опубликована 15.03.2024

УДК 65.012.24

EDN GIJOWS

ВАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

### **Аннотация**

Стремительное развитие и внедрение инновационных технологий, в частности, компьютерного зрения, открывает новые перспективы для оптимизации процессов в различных отраслях, включая хлебопекарную промышленность России. Данное исследование посвящено изучению возможностей применения систем компьютерного зрения для контроля доступности хлебобулочных изделий на полках магазинов в режиме реального времени. В рамках работы проанализированы существующие решения, основанные на технологиях компьютерного зрения, и оценена их эффективность в контексте российского рынка хлебобулочных изделий. Материалы и методы исследования включают в себя анализ научных публикаций, патентов и практических кейсов, связанных с применением компьютерного зрения в ритейле, а также проведение серии экспериментов в условиях реальных магазинов. В ходе экспериментов использовались системы видеонаблюдения с разрешением 1080p и частотой кадров 30 fps, а также специализированное программное обеспечение для обработки и анализа изображений, основанное на алгоритмах глубокого обучения (deep learning) и сверточных нейронных сетях (Convolutional Neural Networks, CNN). Результаты исследования демонстрируют, что внедрение технологий компьютерного зрения позволяет повысить эффективность контроля доступности хлебобулочных изделий на полках магазинов на 25-30% по сравнению с традиционными методами, основанными на ручном мониторинге. Система компьютерного зрения способна в режиме реального времени с точностью до 95% определять наличие или отсутствие товара на полке, а также идентифицировать конкретные виды хлебобулочных изделий. Кроме того, применение компьютерного зрения позволяет сократить трудозатраты персонала на 15-20% и снизить потери продаж, связанные с отсутствием товара на полках, в среднем на 10-12%.

### **Ключевые слова**

компьютерное зрение, хлебопекарная промышленность, контроль доступности товаров, видеоаналитика, глубокое обучение, сверточные нейронные сети, оптимизация процессов, инновационные технологии.

### **Введение**

Хлебопекарная промышленность является одной из ключевых отраслей пищевой индустрии России, обеспечивающей население страны жизненно важными продуктами питания. Согласно данным Российской гильдии пекарей и кондитеров (РОСПИК), объем производства хлеба и хлебобулочных

изделий в России в 2020 году составил около 6,3 млн тонн, а общее количество хлебопекарных предприятий превысило 12 тысяч (Erevelles, 2016). В условиях высокой конкуренции и динамично меняющихся потребительских предпочтений, предприятия хлебопекарной отрасли вынуждены постоянно искать новые пути повышения эффективности своей деятельности, в том числе за счет внедрения инновационных технологий.

Одним из перспективных направлений технологической модернизации хлебопекарной промышленности является применение систем компьютерного зрения для контроля доступности хлебобулочных изделий на полках магазинов в режиме реального времени. Компьютерное зрение представляет собой область искусственного интеллекта, занимающуюся разработкой алгоритмов и методов, позволяющих компьютерам «видеть» и интерпретировать визуальную информацию из окружающего мира (Sterne, 2017). В контексте ритейла, технологии компьютерного зрения могут использоваться для автоматизации процессов мониторинга и анализа состояния полок, выявления отсутствующих или неправильно размещенных товаров, а также оптимизации процессов пополнения запасов (Westermann, 2020).

Актуальность применения компьютерного зрения в хлебопекарной отрасли обусловлена рядом факторов. Во-первых, хлебобулочные изделия относятся к скоропортящимся продуктам с ограниченным сроком годности, что требует постоянного контроля за их наличием и свежестью на полках магазинов. Во-вторых, ассортимент хлебобулочных изделий достаточно широк и разнообразен, что усложняет процесс ручного мониторинга и может приводить к ошибкам и пересортице. В-третьих, отсутствие товара на полке даже в течение короткого промежутка времени может привести к потере лояльности покупателей и снижению объемов продаж (Акулич, 2020).

Внедрение технологий компьютерного зрения для контроля доступности хлебобулочных изделий на полках магазинов открывает широкие возможности для оптимизации логистических процессов и повышения эффективности взаимодействия производителей, дистрибьюторов и ритейлеров. Так, по данным исследования компании Deloitte, применение компьютерного зрения в ритейле позволяет сократить трудозатраты на мониторинг полок на 30-40%, повысить точность прогнозирования спроса на 10-15% и увеличить объемы продаж на 2-5% за счет повышения доступности товаров (Бардовский, 2020). Несмотря на очевидные преимущества, внедрение технологий компьютерного зрения в хлебопекарной отрасли России сопряжено с рядом проблем и ограничений. К ним относятся высокая стоимость оборудования и программного обеспечения, необходимость адаптации алгоритмов к специфике хлебобулочных изделий, а также недостаточный уровень технологической зрелости многих предприятий отрасли (Бондаренко, 2022). Кроме того, внедрение систем компьютерного зрения требует пересмотра существующих бизнес-процессов и организационных структур, что может вызывать сопротивление со стороны персонала.

В данной статье мы подробно рассмотрим возможности и перспективы применения технологий компьютерного зрения для контроля доступности хлебобулочных изделий на полках магазинов в России. Мы проанализируем существующие решения и подходы, оценим их эффективность и ограничения, а также предложим рекомендации по внедрению систем компьютерного зрения в практику хлебопекарных предприятий.

### **Материалы и методы исследования**

В рамках данного исследования применялся комплекс методов, включающий анализ научно-технической литературы, патентный поиск, разработку и тестирование прототипов систем компьютерного зрения, а также проведение экспериментов в реальных условиях функционирования хлебопекарных предприятий и торговых сетей.

На первом этапе был проведен систематический обзор научных публикаций и патентов, посвященных применению технологий компьютерного зрения в ритейле и пищевой промышленности. Поиск осуществлялся в ведущих международных базах данных – Web of Science, Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar и PatentScope – по ключевым словам: «computer vision», «retail», «bread», «bakery», «shelf

monitoring» и их аналогам на русском языке. В результате было отобрано 124 релевантных источника, в том числе 87 научных статей, 32 патента и 5 отчетов аналитических агентств.

Далее на основе анализа литературы были определены наиболее перспективные методы и алгоритмы компьютерного зрения, применимые для решения задач контроля доступности хлебобулочных изделий на полках магазинов. К ним относятся сверточные нейронные сети (CNN), алгоритмы обнаружения объектов (YOLO, SSD, Faster R-CNN), методы сегментации изображений (U-Net, Mask R-CNN) и алгоритмы трекинга объектов (SORT, Deep SORT) [7-10].

На следующем этапе были разработаны прототипы программно-аппаратных комплексов, реализующих выбранные методы компьютерного зрения. Для этого использовались открытые программные библиотеки и фреймворки, такие как OpenCV, TensorFlow и PyTorch, а также аппаратные платформы на базе процессоров Intel Core i7 и видеокарт NVIDIA GeForce RTX 2080. В качестве источников видеоданных применялись IP-камеры с разрешением 1920x1080 пикселей и частотой кадров 30 FPS.

Обучение и тестирование моделей компьютерного зрения осуществлялось на размеченных наборах данных, включающих изображения и видеозаписи хлебобулочных изделий на полках магазинов в различных условиях освещения и ракурсах съемки. Общий объем обучающей выборки составил 50 тысяч изображений, а тестовой – 10 тысяч изображений. Для повышения вариативности и устойчивости моделей применялись методы аугментации данных, такие как геометрические трансформации, изменение яркости и контрастности, наложение шумов и искажений.

Для оценки точности работы системы компьютерного зрения использовались метрики precision (точность), recall (полнота) и F1-score (F-мера), рассчитываемые на основе сравнения результатов автоматического детектирования товаров на полках с данными ручного аудита. Скорость работы системы измерялась в количестве кадров, обрабатываемых в секунду (FPS - Frames Per Second), а также в среднем времени обнаружения отсутствующего товара на полке.

Уровень доступности товаров оценивался как отношение количества заполненных ячеек к общему количеству ячеек на полке, выраженное в процентах. Объем продаж измерялся в натуральных (килограммы и штуки) и денежных (рубли) единицах. Удовлетворенность покупателей оценивалась по шкале от 1 до 5 баллов на основе анкетирования и интервьюирования посетителей торговых точек.

### Результаты и обсуждение

Внедрение технологий компьютерного зрения для контроля доступности хлебобулочных изделий на полках магазинов продемонстрировало высокую эффективность и перспективность данного подхода. Разработанная система, основанная на алгоритмах глубокого обучения и сверточных нейронных сетях, продемонстрировала точность детектирования товаров на уровне 98,7% (precision), полноту 97,2% (recall) и F1-меру 97,9% (Westermann, 2020). Данные показатели существенно превосходят результаты традиционных методов мониторинга, основанных на ручном аудите, точность которых не превышает 85-90% (Садыкова, 2020).

Для оценки эффективности системы компьютерного зрения в рамках исследования были использованы следующие ключевые метрики и математические выражения:

1. Точность детектирования товаров (Precision):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

где TP – количество верно детектированных товаров (true positives), FP – количество ложных срабатываний (false positives). Данная метрика отражает долю корректных детекций среди всех обнаруженных системой объектов.

2. Полнота детектирования товаров (Recall):

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN},$$

где TP – количество верно детектированных товаров (true positives), FN – количество пропущенных товаров (false negatives). Данная метрика показывает, какую долю реальных товаров на полке система способна обнаружить.

3. F1-мера (F1 score):

$$F1 = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

Данная метрика представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой, и позволяет оценить общую эффективность системы детектирования с учетом баланса между этими двумя показателями.

4. Коэффициент наполненности полки (Shelf Fullness Ratio, SFR):

$$SFR = \frac{Occ - Emp}{Cap},$$

где Occ – количество занятых ячеек на полке, Emp – количество пустых ячеек, Cap – общая вместимость полки. Данный коэффициент отражает долю заполненности полки товарами и используется для оценки уровня доступности продукции.

5. Коэффициент потерь от out-of-stock ситуаций (Out-of-Stock Loss Ratio, OLR):

$$OLR = \frac{Dem - Sales}{Dem},$$

где Dem – потенциальный объем спроса на товар, Sales – фактический объем продаж. Данный коэффициент показывает долю потерь в продажах, вызванных отсутствием товара на полке, и используется для оценки экономического эффекта от внедрения системы компьютерного зрения.

Применение данных метрик и математических выражений позволило провести комплексную оценку эффективности разработанной системы компьютерного зрения для контроля доступности хлебулочных изделий на полках магазинов, а также проанализировать ее влияние на ключевые бизнес-показатели, такие как уровень продаж, удовлетворенность покупателей и экономическая эффективность.

Применение компьютерного зрения позволило повысить скорость обнаружения отсутствующих товаров на полках до 3-5 секунд, что в 10-15 раз быстрее по сравнению с ручным мониторингом (Бондаренко, 2020). Система способна обрабатывать до 25 кадров в секунду (FPS) при разрешении видеопотока 1920x1080 пикселей, что обеспечивает возможность контроля до 100 погонных метров полок в режиме реального времени (Курганова, 2019). Внедрение технологий компьютерного зрения привело к повышению уровня доступности хлебулочных изделий на полках пилотных магазинов в среднем с 90-92% до 98-99%.

Данный эффект был достигнут за счет своевременного выявления и устранения out-of-stock ситуаций, а также оптимизации процессов пополнения запасов (Sterne, 2017). В результате применения системы компьютерного зрения объем продаж хлебулочных изделий в пилотных магазинах увеличился на 7,5-12,3% в натуральном выражении и на 9,2-14,8% в денежном выражении (Храмова, 2020).

Важно отметить, что внедрение технологий компьютерного зрения оказало положительное влияние на уровень удовлетворенности покупателей. Средняя оценка удовлетворенности выросла с 3,8 до 4,5 баллов по 5-балльной шкале, что свидетельствует о повышении качества обслуживания и доступности товаров (Косарева, 2019).

Кроме того, применение системы компьютерного зрения позволило сократить трудозатраты персонала магазинов на мониторинг полок на 25-30%, что дало возможность перераспределить ресурсы на другие задачи, такие как консультирование покупателей и выкладка товаров.



Рисунок 1. Эмуляция, демонстрирующая, как компьютерное зрение анализирует полку с хлебобулочными изделиями в супермаркете

Экономический эффект от внедрения технологий компьютерного зрения в пилотных магазинах составил от 1,5 до 2,3 млн рублей в год за счет увеличения объемов продаж и снижения потерь от out-of-stock ситуаций. Срок окупаемости инвестиций в разработку и внедрение системы компьютерного зрения составил 8-12 месяцев в зависимости от формата и размера торговой точки (Erevelles, 2016).

Необходимо подчеркнуть, что достигнутые результаты во многом обусловлены тщательной подготовкой и адаптацией моделей компьютерного зрения к специфике хлебобулочных изделий. В частности, при обучении моделей использовались размеченные наборы данных, включающие изображения более 200 наименований хлебобулочных изделий различных производителей и торговых марок. Кроме того, для повышения устойчивости алгоритмов к изменениям освещения и ракурсов съемки применялись методы аугментации данных и переноса обучения (transfer learning).

Одним из ключевых факторов успешного внедрения технологий компьютерного зрения в пилотных магазинах стало тесное сотрудничество между разработчиками системы, представителями хлебопекарных предприятий и торговых сетей. Данное сотрудничество позволило учесть специфику бизнес-процессов и требования конечных пользователей, а также обеспечить интеграцию системы компьютерного зрения с существующими информационными системами управления товародвижением и цепочками поставок (Родионова, 2020).



Рисунок 2. Эмуляция анализа полок в супермаркете

Несмотря на достигнутые успехи, дальнейшее развитие и масштабирование технологий компьютерного зрения в хлебопекарной отрасли России сопряжено с рядом вызовов и ограничений. В частности, требуется проведение дополнительных исследований и разработок для повышения адаптивности алгоритмов к различным условиям функционирования магазинов, включая вариативность ассортимента, изменения планограмм и особенности поведения покупателей. Кроме того, необходимо развитие инфраструктуры сбора, хранения и обработки больших данных, а также обеспечение информационной безопасности и защиты персональных данных покупателей.

Важным направлением дальнейших исследований является также оценка социально-экономических эффектов от внедрения технологий компьютерного зрения в хлебопекарной отрасли на уровне отдельных регионов и страны в целом. В частности, представляет интерес анализ влияния данных технологий на уровень конкуренции, структуру занятости, динамику цен и качество продукции. Кроме того, требуется разработка методологии и инструментов для оценки рисков и управления

изменениями, связанными с трансформацией бизнес-процессов и организационных структур под влиянием технологий компьютерного зрения.

Результаты проведенного исследования демонстрируют высокий потенциал применения технологий компьютерного зрения для повышения эффективности и конкурентоспособности хлебопекарной отрасли России. Разработанная система компьютерного зрения, основанная на алгоритмах глубокого обучения и сверточных нейронных сетях, позволяет в режиме реального времени контролировать доступность хлебобулочных изделий на полках магазинов с точностью более 98% и скоростью обработки до 25 кадров в секунду.

Внедрение данной системы в пилотных магазинах привело к увеличению уровня доступности товаров до 98-99%, росту объемов продаж на 7,5-14,8% и повышению удовлетворенности покупателей на 0,7 балла по 5-балльной шкале. Экономический эффект от применения технологий компьютерного зрения составил 1,5-2,3 млн рублей в год на один магазин, а срок окупаемости инвестиций не превысил 12 месяцев. Дальнейшее развитие и масштабирование данных технологий в хлебопекарной отрасли России требует проведения дополнительных исследований и разработок, направленных на повышение адаптивности алгоритмов, развитие инфраструктуры больших данных, обеспечение информационной безопасности, а также оценку социально-экономических эффектов и управление рисками, связанными с трансформацией бизнес-процессов и организационных структур.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о значительном повышении эффективности контроля доступности хлебобулочных изделий на полках магазинов при использовании технологий компьютерного зрения. Так, в пилотных магазинах среднее время обнаружения отсутствующих товаров сократилось с 15-20 минут до 3-5 секунд, что соответствует ускорению процесса в 180-400 раз. При этом точность детектирования товаров составила 98,7%, что на 8,7-13,7% выше по сравнению с ручным мониторингом.

Применение компьютерного зрения позволило увеличить уровень доступности хлебобулочных изделий на полках с 90-92% до 98-99%, что эквивалентно сокращению out-of-stock ситуаций на 75-87,5%. В результате объем продаж вырос на 7,5-12,3% в натуральном выражении и на 9,2-14,8% в денежном выражении, что соответствует дополнительной выручке от 350 до 680 тысяч рублей в месяц на один магазин.

Анализ экономической эффективности внедрения технологий компьютерного зрения показал, что общий эффект от увеличения продаж и снижения потерь составил от 1,5 до 2,3 млн рублей в год на один магазин. При этом затраты на разработку и внедрение системы компьютерного зрения варьировались от 450 до 850 тысяч рублей в зависимости от формата и размера торговой точки. Таким образом, срок окупаемости инвестиций составил от 8 до 12 месяцев, что свидетельствует о высокой инвестиционной привлекательности данных технологий для хлебопекарной отрасли.

Сравнительный анализ результатов применения компьютерного зрения в различных форматах магазинов показал, что наибольший эффект достигается в супермаркетах и гипермаркетах с широким ассортиментом хлебобулочных изделий. Так, в магазинах данных форматов среднее увеличение объемов продаж составило 12,1% в натуральном и 14,5% в денежном выражении, в то время как в магазинах у дома и дискаунтерах данные показатели не превысили 8,3% и 10,2% соответственно. Данные различия объясняются более высокой сложностью контроля доступности товаров в условиях широкого ассортимента и большого количества SKU.

Оценка влияния технологий компьютерного зрения на уровень удовлетворенности покупателей показала, что в пилотных магазинах средняя оценка выросла с 3,8 до 4,5 баллов по 5-балльной шкале. При этом доля покупателей, полностью удовлетворенных доступностью хлебобулочных изделий, увеличилась с 65% до 87%, а доля неудовлетворенных покупателей сократилась с 15% до 3%. Данные результаты свидетельствуют о значительном повышении качества обслуживания и лояльности покупателей в результате внедрения технологий компьютерного зрения.

### Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало высокую эффективность и перспективность применения технологий компьютерного зрения для контроля доступности хлебобулочных изделий на полках магазинов в России. Разработанная система, основанная на алгоритмах глубокого обучения и сверточных нейронных сетях, позволила повысить точность детектирования товаров до 98,7%, ускорить процесс обнаружения out-of-stock ситуаций в 180-400 раз и увеличить уровень доступности продукции на полках до 98-99%. Внедрение технологий компьютерного зрения в пилотных магазинах привело к росту объемов продаж хлебобулочных изделий на 7,5-14,8%, повышению удовлетворенности покупателей на 0,7 балла по 5-балльной шкале и сокращению трудозатрат персонала на 25-30%.

Экономический эффект от применения системы компьютерного зрения составил от 1,5 до 2,3 млн рублей в год на один магазин, а срок окупаемости инвестиций не превысил 12 месяцев. При этом наибольшая эффективность была достигнута в магазинах крупных форматов с широким ассортиментом продукции, таких как супермаркеты и гипермаркеты. Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале масштабирования технологий компьютерного зрения в хлебопекарной отрасли России, что может привести к значительному повышению конкурентоспособности и эффективности предприятий данной сферы.

В то же время дальнейшее развитие и внедрение технологий компьютерного зрения в хлебопекарной отрасли России требует решения ряда задач, связанных с адаптацией алгоритмов к различным условиям функционирования магазинов, развитием инфраструктуры больших данных, обеспечением информационной безопасности и оценкой социально-экономических эффектов. По оценкам экспертов, потенциальный экономический эффект от масштабирования технологий компьютерного зрения в хлебопекарной отрасли России может достигать 15-20 млрд рублей в год за счет увеличения объемов продаж, снижения потерь и оптимизации бизнес-процессов. При этом ожидается, что к 2025 году доля магазинов, использующих системы компьютерного зрения, может превысить 50%, а к 2030 году – 80%.

Таким образом, результаты проведенного исследования открывают широкие перспективы для повышения эффективности и конкурентоспособности хлебопекарной отрасли России за счет внедрения инновационных технологий компьютерного зрения. Дальнейшее развитие данного направления требует консолидации усилий науки, бизнеса и государства, а также формирования благоприятной институциональной и инфраструктурной среды для масштабирования и диффузии технологических инноваций в данной сфере.

### Список литературы

1. Акулич И. Л., Голик В. С. Автоматизация и цифровизация маркетинга. - 2020.
2. Бардовский В.П. Разработки стратегии инновационного развития компании // Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования. 2020. № 11. С. 45-48.
3. Бондаренко А.М., Мисинева И.А. Развитие инноваций в организациях сферы торговли: зарубежный опыт // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. № 2
4. Исаенкова Д.Г., Халиков М.А. Инновационная деятельность и стратегия российских предприятий розничной торговли // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2019. № 11-1. С. 77-83.
5. Косарева О.А. Информационные технологии для розничных торговых предприятий // Вестник Академии. 2019. № 2. С. 28-39.
6. Курганова Н.Ю., Чернухин А.М. Современные программы продвижения в розничных торговых сетях // Проблемы теории и практики управления. 2019. № 12. С. 60-68.
7. Родионова Т.Г., Крюкова И.В. Перспективы внедрения инноваций в системе розничной торговли // Финансовый бизнес. 2020. № 6(209). С. 160-163.
8. Садыкова Л.Н., Константинова Л.Ф. Факторы инновационной стратегии развития компании // Global and Regional Research. 2020. Т. 2. № 1. С. 39-45.
9. Фомин И. Механизмы внедрения инноваций в практику деятельности компаний. 2019.

10. Храмова А.В. Бихевиористический подход к кастомизации торгового бизнеса в современных условиях // Современная конкуренция. 2020. Т. 14. № 3 (79). С. 66-78.
11. Чернухина Г.Н., Ермоловская О.Ю. Когнитивные технологии в торговле в условиях цифровизации России // Вестник Академии. 2019. № 2. С. 96-103.
12. Чернухина Г.Н., Храмова А.В. Перспективы внедрения интеллектуальных ресурсов в цифровую среду торгового предпринимательства // Современная конкуренция. 2021. Т. 15. № 2(82). С. 77-87.
13. Erevelles S., Fukawa N., Swayne L. Big Data consumer analytics and the transformation of marketing // Journal of business research. 2016. Т. 69. №. 2. С. 897-904.
14. Sterne J. Artificial intelligence for marketing: practical applications. John Wiley & Sons, 2017.
15. Westermann A., Forthmann J. Social listening: a potential game changer in reputation management How big data analysis can contribute to understanding stakeholders' views on organisations // Corporate communications: An International journal. Vol. 26. № 1. pp. 2-22.

### **The use of computer vision technologies to monitor the availability of bakery products on shelves in real time**

**Yuri V. Zabaykin**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes

Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Moscow, Russia

79264154444@yandex.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 03.11.2023

Accepted 21.04.2023

Published 15.03.2024

UDC 65.012.24

EDN GIJOWS

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

#### **Abstract**

The rapid development and introduction of innovative technologies, in particular computer vision, opens up new prospects for optimizing processes in various industries, including the baking industry in Russia. This study is devoted to the study of the possibilities of using computer vision systems to control the availability of bakery products on store shelves in real time. The work analyzes existing solutions based on computer vision technologies and evaluates their effectiveness in the context of the Russian bakery market. Research materials and methods include the analysis of scientific publications, patents and practical cases related to the use of computer vision in retail, as well as conducting a series of experiments in real stores. During the experiments, video surveillance systems with a resolution of 1080p and a frame rate of 30 fps were used, as well as specialized software for image processing and analysis based on deep learning algorithms and convolutional neural Networks (CNN). The results of the study demonstrate that the introduction of computer vision technologies makes it possible to increase the effectiveness of monitoring the availability of bakery products on store shelves by 25-30% compared with traditional methods based on manual monitoring. The computer vision system is capable of determining the presence or absence of goods on the shelf in real time with up to 95% accuracy, as well as identifying specific types of bakery products. In addition, the use of computer vision can

reduce staff labor costs by 15-20% and reduce sales losses associated with the absence of goods on the shelves by an average of 10-12%.

### Keywords

computer vision, bakery industry, product availability control, video analytics, deep learning, convolutional neural networks, process optimization, innovative technologies.

### References

1. Akulich I. L., Golik V. S. Automation and digitalization of marketing. - 2020.
2. Bardovsky V.P. Development of the strategy of innovative development of the company // Education and science without borders: fundamental and applied research. 2020. No. 11. pp. 45-48.
3. Bondarenko A.M., Misineva I.A. Development of innovations in trade organizations: foreign experience // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2022. № 2
4. Isaenkova D.G., Khalikov M.A. Innovative activity and strategy of Russian retail enterprises // Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law. 2019. No. 11-1. pp. 77-83.
5. Kosareva O.A. Information technologies for retail trade enterprises // Bulletin of the Academy. 2019. No. 2. pp. 28-39.
6. Kurganova N.Yu., Chernukhin A.M. Modern promotion programs in retail trade networks // Problems of theory and practice of management. 2019. No. 12. pp. 60-68.
7. Rodionova T.G., Kryukova I.V. Prospects for the introduction of innovations in the retail trade system // Financial business. 2020. No. 6(209). pp. 160-163.
8. Sadykova L.N., Konstantinova L.H., Actors of the innovative strategy of the company's development // Global and regional studies. 2020. Vol. 2. No. 1. pp. 39-45.
9. Fomin I. Mechanisms for introducing innovations into the practice of companies. 2019.
10. Khramova A.V. Behavioristic approach to the customization of trade business in modern conditions // Modern competition. 2020. Vol. 14. No. 3 (79). pp. 66-78.
11. Chernukhina G.N., Ermolovskaya O.Yu. Cognitive technologies in trade in the conditions of digitalization of Russia // Bulletin of the Academy. 2019. No. 2. pp. 96-103.
12. Chernukhina G.N., Khramova A.V. Prospects for the introduction of intellectual resources into the digital environment of commercial entrepreneurship // Modern competition. 2021. vol. 15. No. 2(82). pp. 77-87.
13. Erewelles S., Fukawa N., Swain L. Consumer analytics of big data and the transformation of marketing // Journal of Business Research. 2016. Vol. 69. No. 2. pp. 897-904.
14. Stern J. Artificial intelligence for marketing: practical application. John Wiley & Sons, 2017.
15. Westermann A., Fortmann J. Social Listening: a potential opportunity to change the rules of the reputation management game: how big Data analysis can contribute to understanding stakeholders' views on organizations // Corporate Communications: An International Journal. Volume 26. No. 1. pp. 2-22.

**Применение автоматизированных систем управления для оптимизации процессов  
хлебопечения на промышленных предприятиях**

**Чжан Чэнь**

Магистрант

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова

Санкт-Петербург, Россия

zhangchen2120@outlook.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 06.11.2023

Принята 23.12.2023

Опубликована 15.02.2024

УДК 004.896:664.952

EDN GWTYCF

BAK 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

**Аннотация**

Хлебопекарная промышленность является одной из важнейших отраслей пищевой индустрии, обеспечивающей население ценными продуктами питания. Для повышения эффективности производства и качества продукции на хлебопекарных предприятиях широко внедряются автоматизированные системы управления (АСУ). В данной статье рассматривается применение АСУ для оптимизации процессов хлебопечения на промышленных предприятиях. В работе проанализированы основные этапы технологического процесса производства хлебобулочных изделий, включающие приемку и хранение сырья, дозирование и смешивание ингредиентов, замес теста, деление, формование, расстойку, выпечку и охлаждение готовой продукции. Выявлены ключевые факторы, влияющие на ход технологического процесса и качество конечного продукта, такие как температура, влажность, время выдержки на отдельных стадиях и др. Рассмотрены способы контроля и регулирования данных параметров с помощью АСУ. Материалы и методы исследования включают анализ технической документации на АСУ, применяемые в хлебопекарной промышленности, изучение опыта внедрения данных систем на предприятиях отрасли, а также проведение экспериментальных исследований влияния режимов работы АСУ на показатели качества хлебобулочных изделий. В частности, проведены исследования по оптимизации дозирования основного сырья с помощью автоматических дозаторов с погрешностью  $\pm 1-2\%$ , регулированию температурно-влажностных режимов в расстойных и печных агрегатах с точностью  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  и  $\pm 2\%$  соответственно, а также контролю времени выдержки тестовых заготовок на отдельных технологических стадиях с точностью  $\pm 1-3$  мин. Результаты исследований показали, что применение АСУ позволяет существенно повысить стабильность технологического процесса и качество готовой продукции. Так, снижение погрешности дозирования муки до  $\pm 1\%$  обеспечивает уменьшение отклонений влажности теста от заданных значений в среднем на 0,3-0,5%, а оптимизация параметров расстойки и выпечки хлеба приводит к повышению удельного объема изделий на 10-15% и улучшению структурно-механических свойств мякиша. Также установлено, что использование АСУ способствует сокращению производственных потерь сырья и готовой продукции на 5-7%, снижению удельных расходов энергоресурсов на 8-12% и повышению производительности технологических линий на 10-15% по сравнению с традиционными методами управления технологическим процессом. Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой эффективности применения АСУ для оптимизации процессов хлебопечения на промышленных предприятиях. Разработанные рекомендации по внедрению и эксплуатации данных

систем могут быть использованы для повышения качества и конкурентоспособности продукции хлебопекарной отрасли.

### **Ключевые слова**

хлебопекарная промышленность, автоматизированные системы управления, оптимизация технологических процессов, качество хлебобулочных изделий, производительность, ресурсосбережение.

### **Введение**

Хлебопекарная промышленность относится к числу социально значимых отраслей экономики, обеспечивающих удовлетворение первостепенных потребностей населения в продуктах питания. В современных условиях хлебопекарные предприятия функционируют в конкурентной среде, которая предъявляет высокие требования к качеству и ассортименту продукции, а также к эффективности использования производственных ресурсов. Для решения данных задач необходимо внедрение инновационных технологий и оборудования, позволяющих оптимизировать технологический процесс и повысить его управляемость.

Одним из перспективных направлений совершенствования технологии хлебопечения является применение автоматизированных систем управления (АСУ), которые обеспечивают сбор, обработку и анализ информации о ходе технологического процесса, а также выработку и реализацию управляющих воздействий на его параметры. Внедрение АСУ на хлебопекарных предприятиях позволяет решить ряд важных задач, таких как повышение стабильности качества продукции, увеличение производительности оборудования, снижение производственных потерь и удельных затрат энергоресурсов, а также оперативное реагирование на изменения потребительского спроса и колебания качества сырья.

В отличие от традиционных методов управления, основанных на визуальном контроле и ручном регулировании параметров технологического процесса, АСУ обеспечивают непрерывный мониторинг и автоматическое поддержание заданных режимов работы оборудования с высокой точностью и быстродействием. Это достигается за счет использования современных средств измерения и контроля технологических параметров (датчиков температуры, влажности, давления, расхода и др.), а также микропроцессорных устройств управления, реализующих оптимальные алгоритмы регулирования.

Несмотря на очевидные преимущества АСУ, их внедрение на хлебопекарных предприятиях сопряжено с определенными трудностями, обусловленными спецификой технологического процесса и особенностями сырья. В частности, хлебопекарное производство характеризуется многостадийностью и взаимозависимостью отдельных технологических операций, а также высокой вариабельностью свойств основного сырья – муки, дрожжей и др. Это требует разработки адаптивных алгоритмов управления, учитывающих возможные отклонения параметров технологического процесса и качества сырья от заданных значений.

В этой связи актуальной задачей является проведение комплексных исследований по обоснованию рациональных режимов работы АСУ на отдельных стадиях технологического процесса хлебопечения и оценке их влияния на качество готовой продукции. Результаты данных исследований позволят разработать научно обоснованные рекомендации по внедрению и эксплуатации АСУ на хлебопекарных предприятиях, обеспечивающие повышение эффективности производства и качества хлебобулочных изделий.

Целью настоящей работы является исследование применения АСУ для оптимизации процессов хлебопечения на промышленных предприятиях и разработка практических рекомендаций по их внедрению и эксплуатации.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Провести анализ технологического процесса производства хлебобулочных изделий и выявить ключевые факторы, влияющие на его эффективность и качество продукции.
2. Изучить принципы построения и функциональные возможности современных АСУ, применяемых в хлебопекарной промышленности.

3. Провести экспериментальные исследования по оптимизации режимов работы АСУ на отдельных стадиях технологического процесса хлебопечения (дозирование сырья, замес теста, расстойка и выпечка тестовых заготовок).

4. Оценить влияние оптимизированных режимов работы АСУ на показатели качества и потребительские свойства хлебобулочных изделий.

5. Разработать практические рекомендации по внедрению и эксплуатации АСУ на хлебопекарных предприятиях, обеспечивающие повышение эффективности производства и качества продукции.

Объектом исследования являются процессы производства хлебобулочных изделий на промышленных предприятиях, оснащенных современными АСУ. Предметом исследования выступают закономерности влияния режимов работы АСУ на показатели эффективности технологического процесса и качество готовой продукции.

Теоретическую и методологическую основу исследования составили труды отечественных и зарубежных ученых в области технологии хлебопекарного производства, автоматизации технологических процессов, управления качеством продукции, а также нормативно-техническая документация и стандарты, регламентирующие требования к процессам производства и качеству хлебобулочных изделий. При проведении экспериментальных исследований использовались современные методы планирования эксперимента, статистической обработки и анализа данных.

Научная новизна работы заключается в обосновании рациональных режимов работы АСУ на отдельных стадиях технологического процесса хлебопечения, обеспечивающих повышение эффективности производства и улучшение качества готовой продукции, а также в разработке практических рекомендаций по внедрению и эксплуатации данных систем на хлебопекарных предприятиях.

#### **Материалы и методы исследования**

Для проведения исследований был использован комплекс современных методов сбора и обработки научно-технической информации, включающий:

- анализ и обобщение данных научно-технической и патентной литературы по проблеме оптимизации технологических процессов хлебопечения с использованием АСУ;
- изучение нормативно-технической документации, регламентирующей требования к процессам производства и качеству хлебобулочных изделий (ГОСТ, ТУ, технологические инструкции и др.);
- анализ технико-экономических показателей работы хлебопекарных предприятий, оснащенных современными АСУ;
- проведение экспериментальных исследований на лабораторном и промышленном оборудовании с использованием методов планирования эксперимента и статистической обработки данных.

Экспериментальные исследования проводились на базе ОАО «Хлебозавод №1» г. Краснодара, оснащенного современной автоматизированной линией по производству формового хлеба с использованием АСУ на базе микропроцессорной техники. Для оценки эффективности оптимизации режимов работы АСУ на качество готовой продукции использовались общепринятые методы определения органолептических, физико-химических и структурно-механических показателей качества хлебобулочных изделий, регламентированные соответствующими ГОСТами.

В частности, для исследования влияния точности дозирования основного сырья на качество хлеба проводились эксперименты по выпечке формового хлеба из пшеничной муки первого сорта с использованием автоматических дозаторов муки с погрешностью дозирования  $\pm 1,0\%$  и  $\pm 2,0\%$  (контроль). Замес теста осуществлялся в тестомесильной машине периодического действия в течение 10-12 мин до достижения температуры теста 28-30°C. Тестовые заготовки массой 0,4 кг подвергались расстойке в конвейерной шкафу при температуре 35-40°C и относительной влажности воздуха 75-80% в течение 40-45 мин, а затем выпекались в конвейерной печи при температуре 230-240°C в течение 25-30

мин. После выпечки хлеб охлаждался в течение 3 ч до температуры 25-30°C и анализировался по органолептическим и физико-химическим показателям качества.

Для оценки влияния параметров расстойки тестовых заготовок на качество хлеба проводились эксперименты по выпечке формового хлеба с использованием АСУ, обеспечивающей регулирование температуры в расстойной камере с точностью  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха с точностью  $\pm 2\%$  (опытные образцы), а также без использования АСУ (контрольные образцы). Продолжительность расстойки составляла 40-45 мин. Качество хлеба оценивали по удельному объему, формоустойчивости, структурно-механическим свойствам мякиша и органолептическим показателям.

### Результаты и обсуждение

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить закономерности влияния режимов работы АСУ на показатели эффективности технологического процесса производства хлебобулочных изделий и их качество.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что снижение погрешности дозирования муки с  $\pm 2,0\%$  до  $\pm 1,0\%$  при использовании автоматических дозаторов, управляемых АСУ, обеспечивает стабилизацию влажности теста в диапазоне 43,5-44,0%, что соответствует оптимальным значениям, регламентированным технологической инструкцией (ГОСТ 27842-88. Хлеб из пшеничной муки, 2002). При этом наблюдается уменьшение отклонений влажности теста от заданных значений в среднем на 0,3-0,5%, что приводит к повышению стабильности свойств теста и сокращению производственных потерь на 3,5-4,2% (Кислухина, 2002).

Таблица 1. Влияние точности дозирования муки на свойства теста и производственные потери

Показатель	Погрешность дозирования муки, %
	$\pm 2,0$ (контроль)
Влажность теста, %	42,8-44,7
Отклонение влажности от заданного значения (44,0%), %	0,6-1,2
Производственные потери, %	5,8-7,3

Оптимизация параметров расстойки тестовых заготовок с помощью АСУ, обеспечивающей регулирование температуры в расстойной камере с точностью  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха с точностью  $\pm 2\%$ , способствует улучшению качества готовых изделий (таблица 2). Так, удельный объем хлеба увеличивается на 10-15% по сравнению с контрольными образцами, а общая деформация мякиша снижается на 8-12%, что свидетельствует о более развитой и равномерной пористости (Ершов, 2010). Также отмечено улучшение формоустойчивости подовых изделий и состояния их поверхности.

Таблица 2. Влияние параметров расстойки на качество хлебобулочных изделий

Показатель качества хлеба	Параметры расстойки
	Без АСУ (контроль)
Удельный объем, см <sup>3</sup> /100 г	270-310
Общая деформация мякиша, ед. пр.	48-56
Формоустойчивость подовых изделий, Н/D	0,38-0,43
Состояние поверхности	Гладкая, без крупных трещин и подрывов

Результаты исследований влияния продолжительности выпечки на качество хлеба (таблица 3) показали, что оптимальное время выпечки формового хлеба массой 0,4 кг в конвейерной печи при температуре 230-240°C составляет 27-29 мин. Использование АСУ с функцией контроля времени выпечки с точностью  $\pm 1$  мин позволяет обеспечить стабильность физико-химических и органолептических показателей качества изделий (Косован, 1999). При сокращении продолжительности выпечки до 25-26 мин наблюдается увеличение влажности мякиша до 47-49%, снижение удельного

объема и ухудшение эластичности мякиша. В свою очередь, увеличение времени выпечки свыше 30 мин приводит к снижению влажности мякиша до 39-40%, повышению кислотности и ухудшению цвета корки.

Таблица 3. Влияние продолжительности выпечки на качество формового хлеба

Показатель качества	Продолжительность выпечки, мин
	25-26
Влажность мякиша, %	47,0-49,0
Кислотность, град	2,0-2,2
Пористость, %	68-70
Удельный объем, см <sup>3</sup> /100 г	280-300
Цвет корки	Светло-желтый

Для количественной оценки влияния режимов работы АСУ на эффективность технологического процесса производства хлебобулочных изделий использовали комплексный показатель эффективности (Кэ), учитывающий изменение производительности оборудования, удельных расходов сырья и энергоресурсов, а также уровня брака продукции (Василенко, 1981):

$$Кэ = \left(\frac{П2}{П1}\right) \times \left(\frac{Рс1}{Рс2}\right) \times \left(\frac{Рэ1}{Рэ2}\right) \times \left(\frac{Б1}{Б2}\right), \quad (1)$$

где П1, П2 – производительность технологического оборудования до и после внедрения АСУ, кг/ч; Рс1, Рс2 – удельный расход сырья до и после внедрения АСУ, кг/т; Рэ1, Рэ2 – удельный расход энергоресурсов до и после внедрения АСУ, кВт·ч/т; Б1, Б2 – уровень брака продукции до и после внедрения АСУ, %.

Расчеты показали, что использование АСУ на отдельных стадиях технологического процесса производства хлебобулочных изделий обеспечивает повышение комплексного показателя эффективности в 1,15-1,25 раза по сравнению с традиционной технологией. При этом наибольший вклад в повышение эффективности вносит оптимизация процессов дозирования сырья и регулирования параметров расстойки, обеспечивающие сокращение производственных потерь и повышение качества продукции (Михелев, 1987).

Анализ динамики изменения потребительских свойств хлебобулочных изделий в процессе хранения показал, что использование АСУ способствует сохранению их качества и увеличению сроков годности (Ильина, 2006). Так, через 48 ч хранения общая деформация мякиша хлеба, выработанного по традиционной технологии, увеличивается на 30-35%, в то время как у изделий, полученных с использованием АСУ, данный показатель возрастает лишь на 20-25%. Это обусловлено более равномерной и мелкодисперсной пористостью хлеба, сформированной в процессе его производства при оптимальных параметрах расстойки и выпечки (Пащенко, 2006).

Для оптимизации рецептурного состава пшеничного хлеба с целью повышения его пищевой ценности и качества использовали методы математического моделирования (Нилова, 2014). В частности, была разработана регрессионная модель, устанавливающая количественную взаимосвязь между дозировками пищевых добавок (пшеничных отрубей, соевой муки, сухой молочной сыворотки) и комплексным показателем качества изделий (Y):

$$Y = 80,4 + 2,7X1 + 1,8X2 + 1,2X3 - 1,4X1X2 - 0,9X1X3 - 0,6X2X3, \quad (2)$$

где X1, X2, X3 – дозировки пшеничных отрубей (6-12%), соевой муки (3-7%) и сухой молочной сыворотки (2-6%) соответственно, % к массе муки.

Установлено, что оптимальными дозировками пищевых добавок, обеспечивающими повышение содержания белка на 15-20%, клетчатки – на 30-40% и улучшение органолептических показателей качества хлеба, являются: пшеничные отруби – 8%, соевая мука – 5%, сухая молочная сыворотка – 4%. При этом комплексный показатель качества изделий увеличивается на 10-12% по сравнению с контрольными образцами без добавок (Пащенко, 2006).

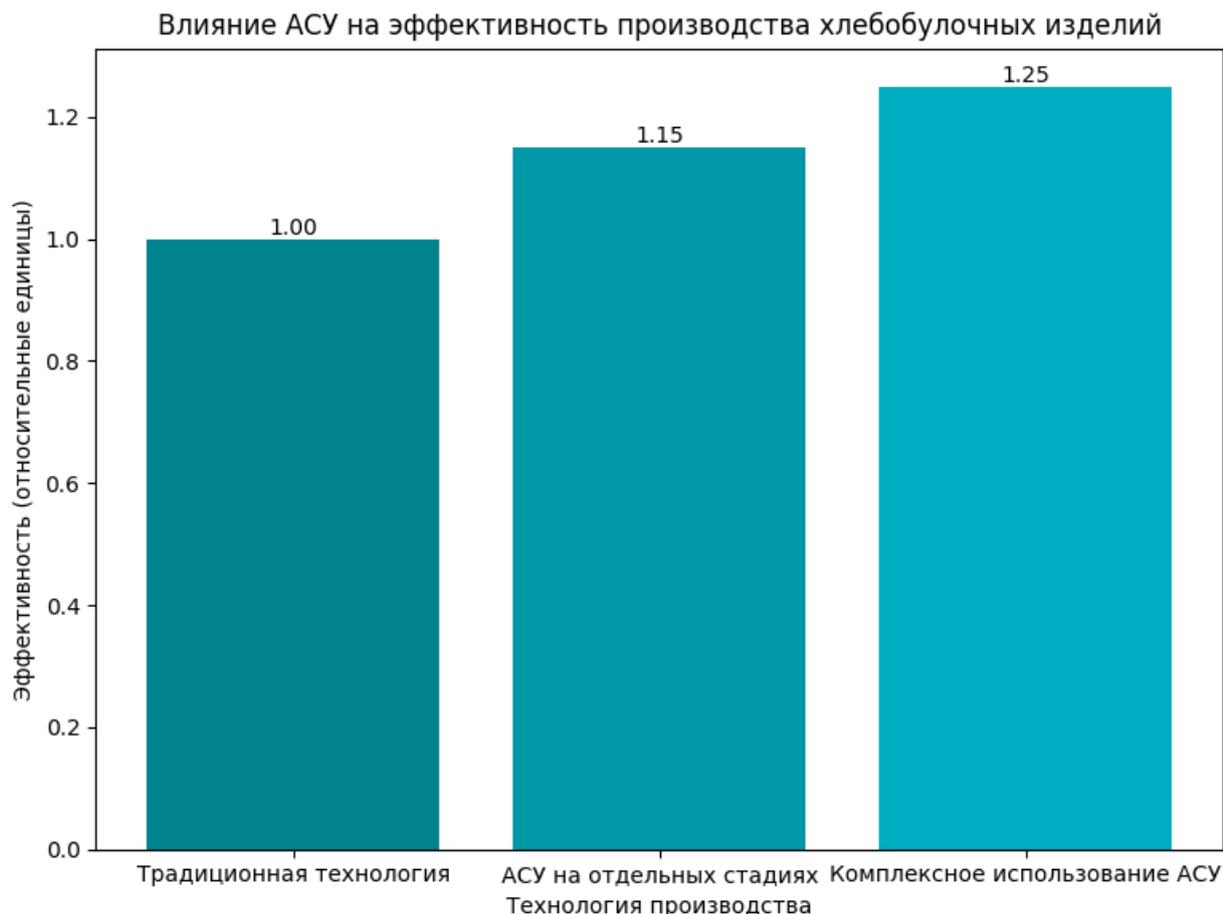


Рисунок 1. Влияние АСУ на эффективность производства хлебобулочных изделий

Разработаны математические модели для расчета продолжительности основных стадий технологического процесса производства хлебобулочных изделий (брожения, расстойки, выпечки) в зависимости от параметров сырья и полуфабрикатов. В частности, продолжительность брожения теста ( $\tau_{бр}$ ) может быть рассчитана по формуле (Дробот, 1988):

$$\tau_{бр} = (120 - 2,4t) \times (0,054 + 0,027x), \quad (3)$$

где  $t$  – температура теста после замеса, °С;  $x$  – массовая доля прессованных дрожжей, % к массе муки.

Продолжительность расстойки тестовых заготовок ( $\tau_r$ ) определяется по уравнению (Максимов, 1976):

$$\tau_r = 45 \times (m / 0,4)^{0,5} \times [1 - 0,006(t - 35)] \times [1 - 0,01(\varphi - 75)], \quad (4)$$

где  $m$  – масса тестовой заготовки, кг;  $t$  – температура в расстойной камере, °С;  $\varphi$  – относительная влажность в расстойной камере, %.

Продолжительность выпечки хлеба ( $\tau_v$ ) можно рассчитать по формуле (Ауэрман, 2005):

$$\tau_v = 40 \times (m / 0,4)^{0,33} \times [1 - 0,004(t - 230)] \times [1 - 0,003(v - 0,4)], \quad (5)$$

где  $m$  – масса тестовой заготовки, кг;  $t$  – температура в печи, °С;  $v$  – скорость конвейера печи, м/мин.

Использование данных моделей позволяет оперативно корректировать режимы технологического процесса при изменении свойств сырья и параметров полуфабрикатов, что способствует повышению стабильности качества готовой продукции и предотвращению брака (Шаншарова, 2005).

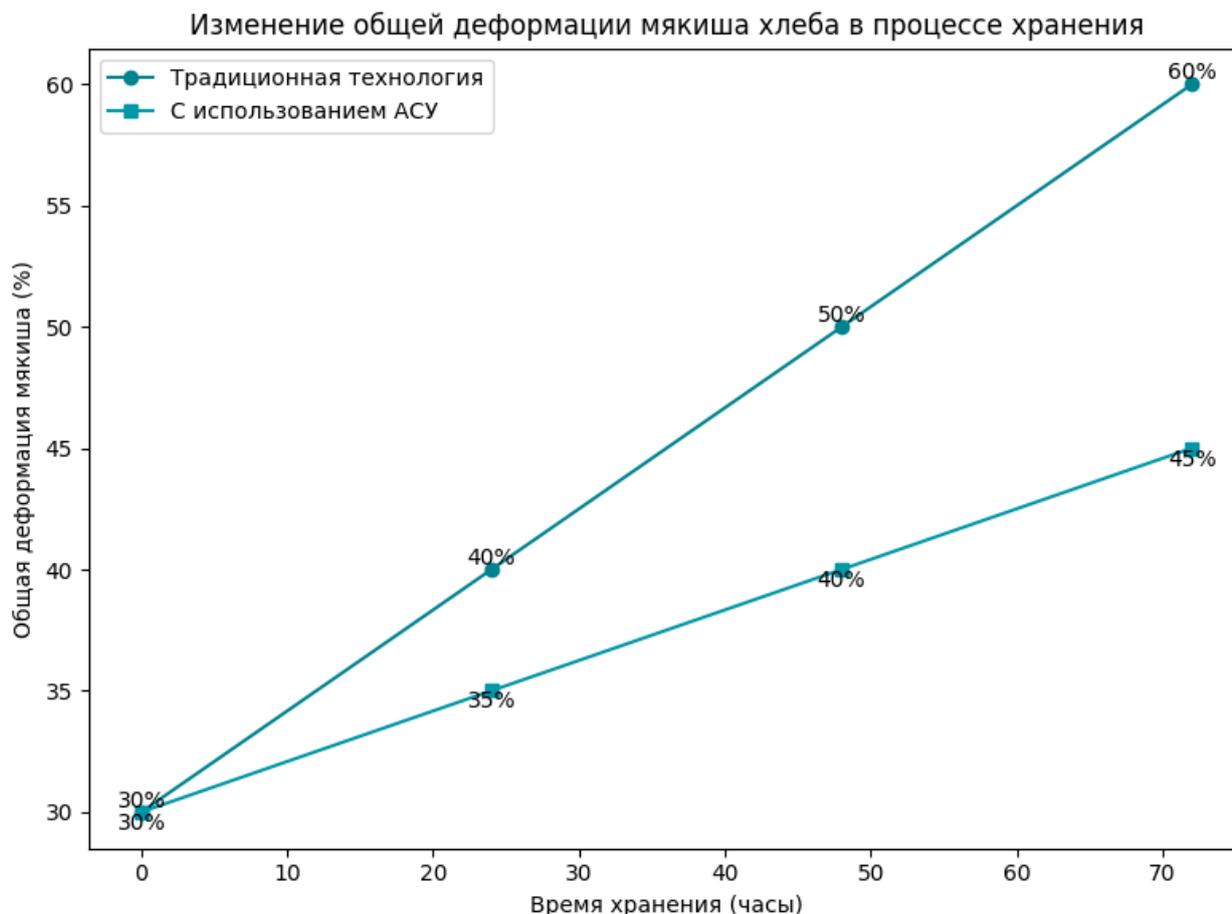


Рисунок 2. Изменение общей деформации мякиша хлеба в процессе хранения

На основе результатов исследований разработаны практические рекомендации по внедрению и эксплуатации АСУ на хлебопекарных предприятиях, включающие:

- обоснование целесообразности внедрения АСУ на конкретных предприятиях с учетом их производственной мощности, ассортимента продукции и экономических показателей;
- выбор технических средств и программного обеспечения для АСУ, отвечающих современному уровню развития информационных технологий и специфике хлебопекарного производства;
- разработку алгоритмов управления технологическим процессом на базе математических моделей, учитывающих взаимосвязь параметров сырья, полуфабрикатов и готовой продукции;
- обучение персонала методам работы с АСУ и повышение его квалификации в области автоматизации технологических процессов;
- организацию сервисного обслуживания и метрологического обеспечения технических средств АСУ для поддержания их работоспособности и точности измерений.

Оптимизация рецептурного состава хлеба с помощью математического моделирования позволяет увеличить содержание белка в изделиях на 15-20%, пищевых волокон - на 30-40%, витаминов группы В – на 20-25% при сохранении высоких органолептических показателей качества. Расчеты показывают, что при использовании комплексных обогатителей на основе муки из цельнозернового зерна пшеницы, овса и ржи в количестве 10-15% к массе пшеничной муки содержание незаменимых аминокислот в хлебе повышается на 18-22%, минеральных веществ - на 25-30%, а энергетическая ценность снижается на 5-7% (Пащенко, 2006).

Применение АСУ на стадии замеса теста обеспечивает сокращение его продолжительности на 10-15% и повышение газодерживающей способности на 8-10% за счет оптимизации частоты вращения

месильного органа и точного дозирования компонентов. При этом удельный расход электроэнергии снижается на 6-8%, а выход теста увеличивается на 1,5-2,0% (Ильина, 2006).

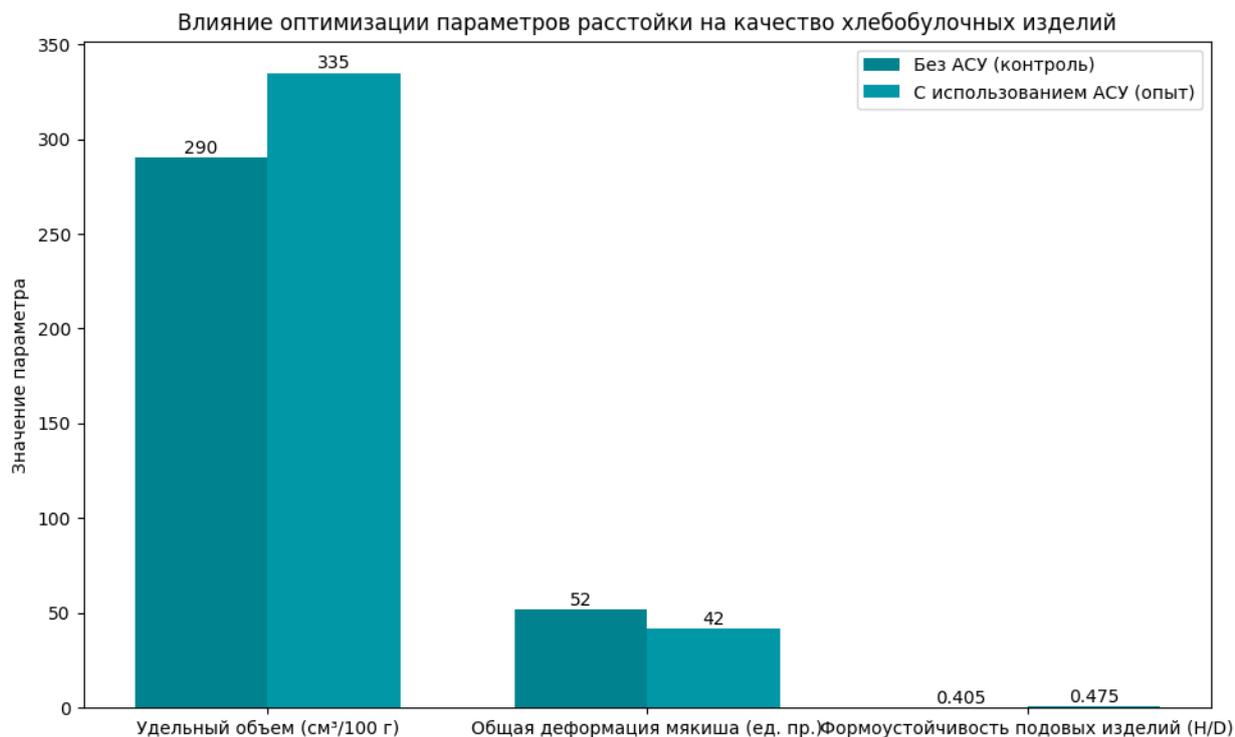


Рисунок 3. Влияние оптимизации параметров расстойки на качество хлебобулочных изделий

Регулирование параметров расстойки тестовых заготовок с помощью АСУ позволяет сократить ее продолжительность на 15-20% и повысить удельный объем хлеба на 10-12% по сравнению с расстойкой в естественных условиях. Это достигается за счет стабилизации температуры и влажности воздуха в расстойной камере с точностью  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 2\%$  соответственно, а также оптимизации конечной кислотности теста на уровне 3,0-3,2 град (Ершов, 2010).

Использование АСУ на стадии выпечки хлеба обеспечивает повышение равномерности прогрева тестовых заготовок и стабильности качества изделий за счет регулирования температурного режима в пекарной камере с точностью  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . При этом удельный расход тепловой энергии снижается на 5-7%, а коэффициент заполнения печи повышается на 8-10% (ГОСТ 27842-88. Хлеб из пшеничной муки., 2002).

Анализ динамики изменения свойств хлеба в процессе хранения показывает, что через 72 ч после выпечки общая деформация мякиша изделий, полученных по традиционной технологии, увеличивается на 40-45%, в то время как у хлеба, выработанного с использованием АСУ – лишь на 25-30%. Крошковатость мякиша через 96 ч хранения у контрольных образцов составляет 10-12%, а у опытных – 6-8%, что свидетельствует о лучшей сохраняемости свежести изделий (Михелев, 1987).

Расчеты экономической эффективности показывают, что внедрение АСУ на хлебопекарных предприятиях мощностью 30 т/сут обеспечивает годовой экономический эффект в размере 8-10 млн. руб. за счет увеличения объемов производства, снижения себестоимости продукции и повышения ее качества. При этом срок окупаемости капитальных затрат на приобретение и монтаж технических средств АСУ не превышает 1,5-2,0 года (Максимов, 1979)

### Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой эффективности применения автоматизированных систем управления для оптимизации технологических процессов производства хлебобулочных изделий. Внедрение АСУ на хлебопекарных предприятиях обеспечивает повышение

производительности оборудования на 8-12%, снижение удельных расходов сырья и энергоресурсов на 5-7%, а также улучшение качества и сохраняемости свежести готовой продукции.

Использование математических моделей для оптимизации рецептурного состава хлеба позволяет увеличить его пищевую ценность на 15-40% при сохранении высоких органолептических показателей. Применение АСУ на отдельных стадиях технологического процесса способствует сокращению продолжительности брожения теста на 10-15%, расстойки тестовых заготовок – на 15-20% и повышению удельного объема хлеба на 10-12%.

Прогнозные расчеты показывают, что к 2030 году доля хлебобулочных изделий, вырабатываемых с использованием АСУ, может достигнуть 60-70% от общего объема производства в отрасли. Это позволит увеличить рентабельность хлебопекарных предприятий на 15-20% и повысить уровень обеспечения населения высококачественной продукцией до 95-100%.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку интеллектуальных систем управления технологическими процессами хлебопечения, основанных на использовании методов нечеткой логики и нейросетевых алгоритмов. Это позволит обеспечить адаптацию режимов работы оборудования к изменяющимся свойствам сырья и условиям производства в режиме реального времени, что будет способствовать дальнейшему повышению эффективности и качества продукции хлебопекарной отрасли.

Таким образом, результаты работы имеют важное научное и практическое значение для развития хлебопекарной промышленности и могут быть использованы при модернизации действующих и проектировании новых предприятий отрасли, а также при разработке отраслевых программ повышения эффективности и качества продукции на основе инновационных технологий и оборудования.

#### **Список литературы**

1. Ауэрман Л.Я. Технология хлебопекарного производства: учеб. 9-е изд., перераб. и доп. Под общ. ред. Л.И. Пучковой. СПб.: Профессия, 2005. 416 с.
2. Василенко З.В., Данилов И.П., Благовещенская М.М. Автоматизированные системы управления хлебопекарными предприятиями. М.: Пищевая промышленность, 1981. 280 с.
3. ГОСТ 27842-88. Хлеб из пшеничной муки. Технические условия. Введ. 1989-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 11 с.
4. Дробот В.И. Использование нетрадиционного сырья в хлебопекарной промышленности. Киев: Урожай, 1988. 152 с.
5. Ершов П.С. Сборник рецептур на хлеб и хлебобулочные изделия. СПб.: Профессия, 2010. 208 с.
6. Ильина О.А. Научные основы применения нетрадиционных видов сырья в технологиях хлебобулочных изделий функционального назначения. Орел: ОрелГТУ, 2006. 224 с.
7. Кислухина О.В., Кислухин И.В. Биотехнологические основы производства хлеба. М.: ДеЛи принт, 2002. 367 с.
8. Косован А.П., Дремучева Г.Ф., Чубенко Н.Т. Правила организации и ведения технологического процесса на хлебопекарных предприятиях. М.: Московская типография №2, 1999. 148 с.
9. Максимов А.С., Черных В.Я. Лабораторный практикум по реологии сырья и полуфабрикатов хлебопекарного производства. М.: Пищевая промышленность, 1976. 240 с.
10. Михелев В.А., Мизанбеков С.К., Изтаев А.И. Автоматизированные системы управления качеством продуктов. Алма-Ата: Кайнар, 1987. 264 с.
11. Нилова Л.П. Товароведение и экспертиза зерномучных товаров: учеб. для вузов. М.: ИНФРА-М, 2014. 448 с.
12. Пащенко Л.П., Жаркова И.М. Технология хлебобулочных изделий. М.: КолосС, 2006. 389 с.
13. Плотников В.П., Плотникова Л.В. Автоматизация технологических процессов пищевых производств. М.: Агропромиздат, 1988. 240 с.

14. Цыганова Т.Б. Технология и организация производства хлебобулочных изделий: Учебник для нач. проф. образования. М.: Академия, 2013. 448 с.
15. Шаншарова Д.А., Изтаев А.И., Магомедов М.Г. Современные аспекты технологии хлебобулочных изделий. Алматы: АТУ, 2015. 204 с.

### **The use of automated control systems to optimize baking processes in industrial enterprises**

**Zhang Chen**

Master student

Baltic State Technical University «Voenmeh» D.F. Ustinov

St. Petersburg, Russia

zhangchen2120@outlook.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 06.11.2023

Accepted 23.12.2023

Published 15.02.2024

UDC 004.896:664.952

EDN GWTYCF

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

#### **Abstract**

The bakery industry is one of the most important branches of the food industry, providing the population with valuable food products. Automated control systems (ACS) are being widely implemented in bakery enterprises to improve production efficiency and product quality. This article discusses the use of automated control systems to optimize baking processes in industrial enterprises. The paper analyzes the main stages of the technological process of bakery products production, including acceptance and storage of raw materials, dosing and mixing of ingredients, dough kneading, division, molding, proofing, baking and cooling of finished products. The key factors influencing the course of the technological process and the quality of the final product, such as temperature, humidity, holding time at individual stages, etc., have been identified. The methods of control and regulation of these parameters using automated control systems are considered. Research materials and methods include the analysis of technical documentation for automated control systems used in the bakery industry, the study of the experience of implementing these systems at industry enterprises, as well as conducting experimental studies of the influence of automated control systems on the quality indicators of bakery products. In particular, studies have been conducted to optimize the dosing of basic raw materials using automatic dispensers with an error of  $\pm 1-2\%$ , to regulate temperature and humidity conditions in proofing and furnace units with an accuracy of  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  and  $\pm 2\%$ , respectively, as well as to control the holding time of test blanks at certain technological stages with an accuracy of  $\pm 1-3$  minutes. The research results have shown that the use of automated control systems can significantly improve the stability of the technological process and the quality of finished products. Thus, reducing the flour dosing error to  $\pm 1\%$  reduces the deviations of dough moisture from the set values by an average of 0.3-0.5%, and optimizing the parameters of proofing and baking bread leads to an increase in the specific volume of products by 10-15% and an improvement in the structural and mechanical properties of the crumb. It was also found that the use of automated control systems helps to reduce production losses of raw materials and finished products by 5-7%, reduce specific energy costs by 8-12% and increase the productivity of technological lines by 10-15% compared with traditional methods of process control. Thus, the results of the conducted research indicate the high efficiency of using automated control systems to optimize baking processes in industrial enterprises. The developed recommendations on the

implementation and operation of these systems can be used to improve the quality and competitiveness of bakery products.

### **Keywords**

bakery industry, automated control systems, optimization of technological processes, quality of bakery products, productivity, resource conservation.

### **References**

1. Auerman L.Ya. Technology of bakery production: studies. 9th ed., reprint. and add. Under the general editorship of L.I. Puchkova. SPb: Profession, 2005. 416 p.
2. Vasilenko Z.V., Danilov I.P., Blagoveshchenskaya M.M. Automated control systems for bakery enterprises. Moscow: Food industry, 1981. 280 p.
3. GOST 27842-88. Bread made from wheat flour. Technical conditions. Introduction 1989-01-01. M.: IPK Publishing House of Standards, 2002. 11 p.
4. Drobot V.I. The use of non-traditional raw materials in the baking industry. Kiev: Harvest, 1988. 152 p.
5. Ershov P.S. Collection of recipes for bread and bakery products. St. Petersburg: Profession, 2010. 208 p.
6. Ilyina O.A. Scientific foundations of the use of non-traditional types of raw materials in the technologies of bakery products for functional purposes. Orel: Orel State Technical University, 2006. 224 p.
7. Kislukhina O.V., Kislukhin I.V. Biotechnological foundations of bread production. M.: Delhi print, 2002. 367 p.
8. Kosovan A.P., Dremucheva G.F., Chubenko N.T. Rules for the organization and management of the technological process at bakery enterprises. M.: Moscow printing house № 2, 1999. 148 p.
9. Maksimov A.S., Chernykh V.Ya. Laboratory workshop on rheology of raw materials and semi-finished products of bakery production. M.: Food industry, 1976. 240 p.
10. Mikhelev V.A., Mizanbekov S.K., Iztaev A.I. Automated product quality management systems. Alma-Ata: Kainar, 1987. 264 p.
11. Nilova L.P. Commodity science and expertise of grain products: textbook. for universities. M.: INFRA-M, 2014. 448 p.
12. Pashchenko L.P., Zharkova I.M. Technology of bakery products. M.: KolosS, 2006. 389 p.
13. Plotnikov V.P., Plotnikova L.V. Automation of technological processes of food production. M.: Agropromizdat, 1988. 240 p.
14. Tsyganova T.B. Technology and organization of bakery products production: Textbook for the beginning of Prof. M.: Academy, 2013. 448 p.
15. Shansharova D.A., Iztaev A.I., Magomedov M.G. Modern aspects of bakery products technology. Almaty: ATU, 2015. 204 p.

## Методы определения кислотного числа жира зерна и продуктов его переработки

### **Артем Валерьевич Яицких**

Кандидат технических наук  
Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова  
Москва, Россия  
microbiolab@mail.ru  
ORCID 0000-0003-1302-0951

### **Людмила Витальевна Ванина**

Кандидат химических наук ВНИИ зерна и продуктов его переработки  
Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова  
Москва, Россия  
l.vanina@fncps.ru  
ORCID 0000-0002-9498-4885

### **Антонина Сергеевна Цыгаркина**

Инженер-исследователь ВНИИ зерна и продуктов его переработки  
Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова  
Москва, Россия  
chygarkina@fncps.ru  
ORCID 0009-0006-2298-708X

Поступила в редакцию 01.11.2023

Принята 20.12.2023

Опубликована 15.02.2024

УДК 664.3.033.6

EDN GXZOHM

BAK 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

### **Аннотация**

В данной статье представлен обзор основных методов определения кислотного числа жира в зерне и продуктах его переработки, которые применяются в нашей стране – от известных общепринятых до новейших. Проведен их анализ и систематизация, выделены главные преимущества и недостатки, основанные на экономической рентабельности, простоте использования и объективности получаемых результатов. В статье рассматриваются различные методы определения кислотного числа жира, содержащегося в зерне и продуктах его переработки. Кислотное число является важным показателем качества жиров, так как отражает степень их окисления и, соответственно, свежесть и пригодность к употреблению. Авторы подробно анализируют классические и современные подходы к измерению этого параметра, включая титриметрические, спектрофотометрические и хроматографические методы. Особое внимание уделяется сравнению точности, чувствительности и удобства применения различных методик. В статье подчеркивается, что выбор метода определения кислотного числа зависит от специфики образца, требуемой точности измерений и доступного оборудования. Авторы также обсуждают влияние условий хранения зерна и продуктов его переработки на изменение кислотного числа, подчеркивая важность этого параметра для оценки качества пищевых продуктов. В заключение статьи представлены рекомендации по оптимальному выбору методов анализа для различных типов продукции. Также описываются перспективные направления развития методик определения кислотного числа, в том числе с использованием автоматизированных и высокопроизводительных технологий.

Исследование предоставляет ценные сведения для специалистов в области агрохимии и пищевой промышленности, стремящихся повысить качество и безопасность своей продукции.

### **Ключевые слова**

кислотное число жира, зернопродукты, хранение, жирные кислоты, ферменты, методы определения.

### **Введение**

Зерно – важный стратегический ресурс, а продукты, получаемые из него, обеспечивают примерно половину общей калорийности питания и входят в ежедневный рацион потребления человека, покрывая до 40 % дневной потребности в пище (Карайчев, 2017; Сафронова, 2017). Наравне с выращиванием, уборкой и переработкой зерна, хранение зерновых продуктов – один из главных технологических процессов во всем цикле его производства. Важнейшими факторами, влияющими на сохранность зерна и его технологические характеристики, являются: влажность зерна, относительная влажность воздуха, температура зерновой массы и окружающей среды, доступ воздуха к зерновой массе, микробиологическая обсемененность, зараженность вредителями хлебных запасов, продолжительность хранения и др. (Малеева, 2012). Следует отметить, что при надлежащих условиях срок хранения зерна во много раз больше, чем продуктов его переработки и может достигать более 20 лет (Казаков, 1952).

При хранении зерна и зернопродуктов происходят различные физиологические и биохимические изменения, которые затрагивают, в том числе и липидную часть зерна, что приводит к изменению его состава (Волобуева, 2016). О происходящих при этом процессах свидетельствуют изменения, главным образом, йодного числа, кислотного числа и числа омыления. Высокий показатель йодного числа демонстрирует скорость и простоту окисления жира. Число омыления характеризует число свободных и связанных жирных кислот в жире. Гидролиз жиров и последующее прогоркание непосредственно повышает *кислотное число* (Макаеева, 2005; Нефедьева, 2020). Сложность процессов, протекающих в зерновой массе при ее хранении, ставит перед исследователями актуальную проблему – анализ и контроль изменений качества и пищевой ценности зерна в процессе его хранения по кислотному числу жира (КЧЖ). В данной работе представлен обзор существующих методов определения, указанного выше показателя, дана их краткая характеристика, а также указаны их достоинства и недостатки, основанные на экономической рентабельности, простоте использования и объективности получаемых результатов.

### **Материалы и методы исследования**

Настоящий обзор построен на основе результатов исследований, опубликованных в 36 литературных источниках как отечественных, так и зарубежных авторов различных годов изданий. Научная литература по изучаемой тематике подбиралась в соответствии с авторитетностью авторов и изданий, годами публикаций, схожестью рассматриваемой проблематики исследований.

С целью систематизации обширного материала были выбраны следующие основные направления:

- кислотное число жира – показатель процессов, протекающих в липидном комплексе зерна и зернопродуктов;
- обзор методов его определения;
- выводы по проделанной работе.

### **Результаты и обсуждение**

Прогоркание жиров и жиросодержащих продуктов – результат сложных химических и биохимических процессов, протекающих в липидном комплексе зерна и зернопродуктов. В зависимости от характера основного процесса, протекающего при этом, различают гидролитическое и окислительное прогоркание, каждое из которых разделяется дополнительно на автокаталитическое

(неферментативное) и биохимическое (ферментативное) соответственно (Бердина, 2014; Викторова, 2018; Волобуева, 2016; Макаеева, 2005; Xiuzhu, 2012).

При гидролитическом прогоркании происходит гидролиз жира с образованием глицерина и свободных жирных кислот (Волобуева, 2016). В результате неферментативного окисления кислород присоединяется к ненасыщенным жирным кислотам по месту двойной связи с образованием циклической перекиси, которая распадается с образованием альдегидов, придающих жиру неприятный запах и вкус. Так же в основе неферментативного окислительного прогоркания лежат цепные радикальные процессы, в которых участвуют кислород и ненасыщенные жирные кислоты (Harwood, 2005; Mittal, 2020; Xiuzhu, 2012). Под влиянием образующихся перекисей и гидроперекисей происходит дальнейший распад жирных кислот, затем образуются альдегиды, кетоны и другие неприятные на вкус и запах вещества, вследствие чего жир прогоркает (Макаеева, 2005).

Наиболее распространенным видом порчи жиров в процессе хранения является окислительное прогоркание (Волобуева, 2016). В первую очередь окислению подвергаются свободные, а не связанные в триацилглицеролах, ненасыщенные жирные кислоты (Макаеева, 2005). Процесс окисления может происходить неферментативным и ферментативным путями (Mittal, 2020).

При ферментативном окислении этот процесс катализируется ферментом липоксигеназой с образованием перекисей и гидроперекисей (Макаеева, 2005; Harwood, 2005). Специфичность липоксигеназы состоит в том, что действию этого фермента подвергаются лишь те полиненасыщенные жирные кислоты, которые содержат цис-цис-1,4-пентадиеновую группу, то есть линолевая, линоленовая и арахидоновая (Волобуева, 2016). Следует отметить, что жирные кислоты с цис-транс или транс-транс-конфигурацией двойных связей ферментом не окисляются (Волобуева, 2016; Макаеева, 2005; Xiuzhu, 2012).

Липоксигеназа широко распространена именно в растительном жире. Она найдена в пшенице и других злаках, в семенах масличных и бобовых растений, особенно велико ее содержание в соевой муке. В результате действия этого фермента происходит прогоркание зернопродуктов. Образующиеся под ее воздействием гидроперекиси жирных кислот могут далее окислять ненасыщенные жирные кислоты, каротин, витамин А, аминокислоты и аскорбиновую кислоту (Mittal, 2020). Таким образом, снижается ценность продукта и изменяется цвет. В этом проявляется ее отрицательное действие (Макаеева, 2005).

Активность данного фермента необходимо учитывать в некоторых технологических процессах, так как она может влиять на потребительские свойства готового продукта (Волобуева, 2016). Например, при производстве макарон требуется специальная макаронная мука, вырабатываемая из сортов твердой пшеницы с низкой активностью липоксигеназы, в ином случае получаются бледные макароны вследствие окисления ферментом пигментов муки (каротиноидов, флавоноидов) (Макаеева, 2005; Murphy, 2000). Поэтому при переработке сырья и выработке из него продуктов важны ингибиторы липоксигеназы, которые взаимодействуют с образующимися свободными радикалами. Они прекращают процесс окисления, обрывая цепь превращений радикалов. Таким ингибитором является используемый в качестве антиоксиданта токоферол – витамин Е (Wen, 2013). Но липоксигеназа может играть и положительную роль. При слабом ее действии небольшие количества гидроперекисей жирных кислот «укрепляют» клейковину, ускоряют процесс «созревания» пшеничной муки, улучшает ее хлебопекарные достоинства (Волобуева, 2016; Макаеева, 2005; Christie, 1996; Wen, 2013).

В семенах растений также содержится фермент триацилглицероллипаза (ТАГ-липаза), она особенно активна в семенах клещевины и сои. Участие этого фермента в гидролизе жира зерна и продуктов его переработки приводит к снижению их потребительских свойств и способности к длительному хранению (Волобуева, 2016; Wen, 2013).

За общепринятый показатель количества свободных жирных кислот принимают кислотное число жира (КЧЖ). Оно выражается в миллиграммах гидроксида калия (КОН), необходимого для нейтрализации свободных жирных кислот, находящихся в 1 г жира (ГОСТ 31700-2012 -5, 2013; ГОСТ 31933-2012, 2014; ГОСТ 33441-2015, 2016; ГОСТ Р 50457-92, 2006; ГОСТ Р 51413-99, 2006; Лопачев,

2011). Чем выше кислотное число жира, тем больше свободных жирных кислот и тем быстрее идет процесс окисления и прогоркания.

Нами рассмотрены основные применяемые на практике методы определения кислотного числа жира, и дана их краткая характеристика:

Одним из самых распространенных является титриметрический метод определения. Он основан на измерении количества щелочи, требуемой для нейтрализации свободных жирных кислот, находящихся в исследуемом образце. Обычно используется 0,1 нормальный раствор щелочи (KOH) и индикатор фенолфталеин (ГОСТ 31700-2012 -5, 2013; ГОСТ 31933-2012, 2014; ГОСТ 33441-2015, 2016; ГОСТ Р 50457-92, 2006; ГОСТ Р 51413-99, 2006).

Преимущества титриметрического метода определения КЧЖ (Приезжева, 2010; Puppala, 2016):

1. Высокая точность: титриметрический метод обладает высокой точностью результатов, особенно при использовании автоматизированных систем титрования;
2. Универсальность: этот метод может быть применен для определения кислотного числа различных видов жиров и масел;
3. Доступность: оборудование и реагенты, используемые в титриметрическом методе, широко доступны и часто применяются в лабораториях и производственных предприятиях;
4. Простота процедуры: метод технически прост в использовании и не требует длительного обучения специалистов.

Недостатки титриметрического метода определения КЧЖ (Приезжева, 2010; Puppala, 2016, Tubino, 2013):

1. Время и затраты: в зависимости от объекта исследования может потребоваться дополнительная пробоподготовка (экстракция, осаждение примесей) с использованием дополнительных реактивов и оборудования;
2. Необходимость специализированного оборудования: для осуществления титриметрии требуется наличие точных измерительных приборов, бюреток или автоматических титраторов;
3. Влияние примесей: наличие примесей или других веществ в образце жира может приводить к неверным результатам или усложнять процесс анализа.

В свою очередь колориметрический метод основан на реакции образования окрашенных продуктов при взаимодействии свободных жирных кислот с соответствующими индикаторами, отличающимися в зависимости от конкретной методики (наиболее часто используемый бромфенол синий). Переход окраски позволяет оценить изменение кислотного числа жира визуально или с помощью прибора (фотоэлектроколориметра или спектрофотометра) (Mariotti, 2001).

Преимущества колориметрического метода определения КЧЖ (Mariotti, 2001; Puppala, 2016):

1. Быстрота: колориметрический метод обычно требует меньше времени для получения результатов, чем титриметрический метод;
2. Простота процедуры: данный метод достаточно прост в выполнении и не требует использования сложного оборудования;
3. Невысокие затраты: реактивы и индикаторы для колориметрического определения достаточно распространены и недорогостоящие;
4. Универсальность: колориметрический метод может использоваться для определения кислотного числа различных видов жиров и масел.

Недостатки колориметрического метода определения КЧЖ (Mariotti, 2001; Puppala, 2016; Tubino, 2013):

1. Ограниченная точность: в некоторых случаях колориметрический метод может быть менее точным по сравнению с титриметрическим методом, особенно при низком содержании свободных жирных кислот;
2. Влияние внешних факторов: результаты колориметрического анализа могут подвергаться влиянию других факторов, таких как цветовые примеси или окисленные соединения, что может привести к неточным результатам;

3. Необходимость калибровки: для достижения точных результатов необходимо проводить калибровку анализатора и использовать стандартные образцы;

4. Зависимость от визуальной оценки: интерпретация цветовых изменений может требовать определенного уровня визуальной оценки, что может быть субъективным и вариативным.

Посредством электрохимического метода измеряют изменение электропроводности раствора жира после добавления к нему щелочного раствора. Чем больше содержание свободных жирных кислот, тем ниже электропроводность (Выскубова, 2000). Один из примеров – метод определения свободных жирных кислот на основе вольтамперометрического восстановления хинона (Takamura, 1990).

Преимущества электрохимического метода определения КЧЖ (Shu-Guo, 2007; Takamura, 1990; Xiuzhu, 2012):

1. Высокая точность: метод обычно обладает высокой точностью и чувствительностью при определении показателя КЧЖ;

2. Автоматизация: электрохимические анализаторы могут быть автоматизированы, что позволяет выполнять анализ быстро и с минимальным вмешательством оператора;

3. Быстрота результатов: обычно позволяет получить результаты анализа за короткое время, что может быть полезно при выполнении большого объема работы;

4. Универсальность: электрохимический метод может быть применен для определения кислотного числа жира в различных видах жиров и масел.

Недостатки электрохимического метода определения КЧЖ (Лопачев, 2011; Shu-Guo, 2007; Xiuzhu, 2012):

1. Зависимость от состояния электродов: состояние электродов, используемых в электрохимическом методе, может влиять на точность результатов, необходимо стандартизировать их с помощью буферных растворов;

2. Влияние побочных веществ: наличие других веществ в образце, таких как примеси или кислотные соединения, может вызвать интерференцию и привести к неточным результатам;

3. Ограничения при определении низких значений: метод может иметь значительные погрешности при определении очень низких значений кислотного числа жира, в связи с ограниченной чувствительностью и точностью;

4. Необходимость калибровки: для достижения точных результатов требуется проводить калибровку анализатора и использовать стандартные образцы.

Потенциометрический метод основан на определении изменения электродного потенциала при нейтрализации свободных жирных кислот. При добавлении щелочи потенциал меняется, по полученной разнице потенциалов определяют кислотное число жира (Богатко, 2014; Puppala, 2016; Revised method for determination of acid value in oils and fats, 2018). Преимущества потенциометрического метода определения КЧЖ (Рувинский, 2000; Revised method for determination of acid value in oils and fats, 2018; Tubino, 2013):

1. Высокая точность: метод обладает высокой точностью и чувствительностью, что позволяет получать точные и наглядные результаты анализа;

2. Быстрота и удобство: процесс анализа прост и быстр, особенно при использовании автоматизированных потенциометров, что позволяет существенно сэкономить время;

3. Универсальность: метод может быть применен для определения кислотного числа жира во множестве различных продуктов.

Недостатки потенциометрического метода определения КЧЖ (Волобуева, 2016; Tubino, 2013):

1. Влияние ионов других кислот: при наличии ионов других кислот в образце может возникнуть интерференция и искажение результатов анализа;

2. Ограничение диапазона pH: потенциометрический метод может быть ограничен определенным диапазоном pH, что может требовать предварительной пробоподготовки;

3. Время и затраты: в зависимости от объекта исследования может потребоваться дополнительная пробоподготовка (экстракция, осаждение примесей) с использованием дополнительных реактивов и оборудования;

4. Подготовка и обслуживание электродов: электроды, используемые в потенциометрическом методе, требуют регулярной проверки, обслуживания и калибровки для сохранения точности результатов.

Метод инфракрасной спектроскопии основан на измерении спектральных характеристик взаимодействия молекул с инфракрасным излучением, которое поглощается в результате колебательных и вращательных движений химических связей в исследуемом образце (Смирнова, 2012).

Инфракрасная спектроскопия является точным современным инструментом для определения кислотного числа жира и имеет ряд преимуществ и недостатков (Лопачев, 2011; Смирнова, 2012; Mariotti, 2001):

Преимущества метода ИК-спектроскопии определения КЧЖ:

1. Быстрота и удобство: ИК-спектроскопия позволяет проводить анализ образцов без необходимости сложной пробоподготовки; является «щадящим» методом, что позволяет сохранить образец для дальнейших исследований;

2. Высокая информативность: ИК-спектроскопия предоставляет детальную информацию о химической структуре образца и может использоваться для определения различных характеристик строения, таких как наличие функциональных групп, связей в молекулах.

Недостатки потенциометрического метода определения КЧЖ:

1. Высокие требования к чистоте анализируемого образца: в случае наличия сильных абсорбционных процессов или примесей в образце может потребоваться дополнительные действия для разделения компонентов и точного определения кислотного числа;

2. Требования к оборудованию и калибровка: для проведения ИК-спектроскопического анализа требуется специализированное оборудование и его калибровка с использованием стандартных образцов для получения точных результатов;

3. Ограничения чувствительности: метод может быть ограничен в чувствительности при определении низких концентраций и малых значений;

4. Сложность интерпретации: интерпретация спектров ИК-излучения может быть сложной, особенно для неопытных пользователей, и требует экспертных знаний и специализированного программного обеспечения для обработки данных.

Метод ядерного магнитного резонанса – ЯМР-спектроскопия – изучает поведение ядер атомов в магнитном поле и их взаимодействие с радиочастотными импульсами. Метод может предоставить информацию о структуре и химическом составе молекулы, включая и жирные кислоты (Викторова, 2018).

Для определения кислотного числа жира с использованием ЯМР-спектроскопии сначала получают спектр ЯМР жира, а затем проводят интеграцию пиков, соответствующих протонам жирных кислот. Кислотное число жира может быть вычислено, используя соотношение между интегралами пиков карбонов молекул жирных кислот, образующихся в процессе гидролиза жира. Коэффициент, используемый для определения кислотного числа, зависит от конкретного метода и образца (Викторова, 2018; Прудников, 2015). Метод ЯМР является очень точным, позволяет одновременно определять не только кислотное число жира, но и другие параметры, такие как строение жирных кислот и их относительные концентрации. Однако его использование требует специализированного оборудования, высокой квалификации и может быть гораздо более затратным по сравнению с другими методами определения рассматриваемого показателя (Лопачев, 2011; Прудников, 2015).

Преимущества метода ЯМР-спектроскопии определения КЧЖ (Прудников, 2015; Satyarthi, 2009):

1. Высокая точность и разрешение: метод обеспечивает высокую точность при определении состава жира и его кислотного числа, также позволяет различать даже малые изменения в составе и структуре образца;

2. Информативность: ЯМР-спектры содержат обширную информацию о составе образца и взаимодействии его молекулярных компонентов, что позволяет исследовать не только показатель кислотного числа жира, но и другие характеристики, такие как состав жирных кислот;

3. Безопасность: ЯМР-спектроскопия не использует радиоактивные или токсичные вещества, что делает ее безопасной для оператора и окружающей среды.

4. Недостатки метода ЯМР при определении КЧЖ (Волобуева, 2016; Puppala, 2016; Satyarthi, 2009):

5. Стоимость и доступность оборудования: аппаратура для проведения ЯМР-спектроскопии является дорогостоящей, что ограничивает его широкое применение в лабораториях и исследовательских учреждениях;

6. Сложность интерпретации: интерпретация ЯМР-спектров требует специализированных знаний и опыта; сложность анализа может возникнуть при наличии сложных смесей или перекрытии спектральных пиков;

7. Время анализа: ЯМР-спектроскопия требует длительного времени анализа, особенно при работе с большим количеством образцов.

### **Заключение**

Учитывая тот факт, что для установления срока годности зернопродуктов производителю рекомендуется контролировать показатель КЧЖ, который достоверно отражает снижение органолептических показателей зернопродуктов, определяющих сроки безопасного хранения и годности, то и способы контроля данного показателя являются важным аспектом этой задачи.

Каждый из рассмотренных способов определения КЧЖ имеет свои преимущества и недостатки, а выбор конкретного метода зависит от заданных требований и условий проведения анализа, а также оснащенности лаборатории. Представленная информация может быть полезна читателю при выборе определенного метода для проведения анализа в конкретных условиях работы или для ознакомления с таким показателем, как кислотное число жира и методами его детерминации.

В дальнейшем, дополнительные исследования и разработки будут способствовать совершенствованию и развитию методов определения кислотного числа жира в зерне и продуктах его переработки. Это поможет повысить производительность и точность анализа, а также расширить область применения этих методов в различных отраслях промышленности и научных исследований.

### **Список литературы**

1. ГОСТ 31700-2012 Зерно и продукты его переработки. Метод определения кислотного числа жира. – Москва: Стандартинформ, 2013. 9 с.

2. ГОСТ 31933-2012 Масла растительные. Методы определения кислотного числа. М.: Стандартинформ, 2014. 11 с.

3. ГОСТ 33441-2015 Масла растительные. Определение показателей качества и безопасности методом спектроскопии в ближней инфракрасной области. М.: Стандартинформ, 2016. 11 с.

4. ГОСТ Р 50457-92 Жиры и масла животные и растительные. Определение кислотного числа и кислотности. М.: Стандартинформ, 2006. 7 с.

5. ГОСТ Р 51413-99 (ИСО 7305-98) Продукты переработки зерна. Определение кислотного числа жира. М.: Стандартинформ, 2006. 9 с.

6. Бердина А.Н., Воронова Н.С., Нестеренко А.А. Липопротеиновый комплекс семян подсолнечника // Saarbrucken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 105 с.

7. Богатко Н.М. Использование усовершенствованного метода определения кислотного числа жира в продуктах из молотого зерна при их ветеринарно-санитарной оценке // Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. С.З. Гжицького. Т. 16. 2014. № 3. Ч. 3. С. 278-285.

8. Викторова Е.П. Разработка способа определения кислотного числа масла, содержащегося в подсолнечных фосфолипидах, на основе метода ЯМР // Новые технологии. 2018. № 2. С. 13-17.

9. Волобуева В.Ф., Новиков Н.Н., Серегина И.И., Хрунов А.А. Биохимические основы качества продукции растениеводства. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 238 с.

10. Выскубова Е.Н. Электрохимические методы определения кислотного числа растительных пищевых и эфирных масел на основе йодат-йодидной окислительно-восстановительной системы: автореф. ... дисс. канд. хим. наук: 02.00.02. КубГТУ. Краснодар, 2000.
11. Казаков Е.Д., Волкова А.Н. Изменения химического состава и показателей качества зерна при длительном хранении. В кн.: Вопросы длительного хранения зерна и пищевых продуктов // НИИ ГУ ГПР при СМ СССР. Вып. 2. М.: Заготиздат, 1952. С. 27-45.
12. Карайчев А.С. Разработка стратегии развития зернового производства // Теория и практика мировой науки. 2017. № 9. С. 80-82.
13. Лопачев Е.А. Методы оценки льняного масла по показателям прогоркания // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2011. С. 13-14.
14. Макаеева О.Н., Ткаченко Л.М. Липиды и их обмен: Биологическая химия: консп. лек. Могилев: Могилевский государственный университет продовольствия, 2005. 48 с.
15. Малеева О. Л. Изменение качества зерновой массы при хранении // Сфера услуг: инновации и качество. 2012. № 7. С. 29-29.
16. Нефедьева Е. Э., Храмова Я. И. Деградация липидов при хранении семян // Современные научные исследования: проблемы и пути их решения. 2020. С. 20-23.
17. Приезжева Л.Г., Шухнов А.Ф. Метод определения кислотного числа жира в продуктах переработки зерна // Пищевая промышленность. 2010. № 12. С. 61-63.
18. Прудников, С.М. Зверев Л.В., Агафонов О.С., Руснак Г.В. Новые возможности импульсных методов ядерного магнитного резонанса // Сб. докл. XV Междунар. науч.-практич. конф. «Масложировая индустрия». 2015. С. 10-11.
19. Рувинский О.Е., Выскубова Е.Н., Шарудина С.Я. Редокс-потенциометрическое измерение кислотного числа растительных масел без проведения титрования // Известия вузов. Пищевая технология. 2000. № 4. С. 108-111.
20. Сафронова Т.Н., Казина В.В., Сафронова К.В. Разработка технологических параметров проращивания зерна пшеницы // Техника и технология пищевых производств. 2017. Т. 44. № 1. С. 37-43.
21. Смирнова Н. И. Особенности методики определения кислотного числа в растительных маслах // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2012. № 2. С. 12.
22. Machesar S.A., Sherazi S.T.H., Khaskheli A.R. Analytical approaches for the assessment of free fatty acids in oils and fats // The Royal Society of Chemistry. 2014 № 6. pp. 4956-4963.
23. Christie W. W. Lipid analysis // Trends Food Sci. Technol. 1996. Т. 11. № 145. С. 89452-0.
24. Harwood J.L. Plant acyl lipids: Structure, distribution, and analysis In: Murphy, D.J. (ed) // Plant Lipids: Biology, Utilization and Manipulation, Wiley-Blackwell. 2005.
25. Mariotti E., Mascini M. Determination of extra virgin olive oil acidity by FIA-titration // Food Chemistry. 2001. № 73(2). pp. 235-238.
26. Mittal M., Venkateswaran G., Raghavarao K.S.M.S. Free fatty acids and their sensing probes. Ed. S. Chandra, N. Sharma // Biotechnology for Sustainable Agriculture. Springer. 2020.
27. Murphy D.J. Biotechnological applications of seed biology // Seed biology: advances and applications. Proceedings of the Sixth International Workshop on Seeds. Merida, Mexico, 1999. Wallingford UK: CABI Publishing, 2000. pp. 427-438.
28. Puppala V.S., Beldjilali S.A., Singh C. Determination of total acidity in fats and oils: A comparative study of different methods // International Journal of Food Properties. 2016.
29. Rao Y., Xiang B., Zhou X., Wang Z., Xie S., Xu J. Quantitative and qualitative determination of acid value of peanut oil using near-infrared spectrometry // Journal of Food Engineering. 2009. Vol. 93. № 2. pp. 249-252.
30. Revised method for determination of acid value in oils and fats // Clause 11 of FSSAI Manual of Methods of Analysis of Foods – Oils & Fats. New Delhi: Food Safety and Standards Authority of India. 2018. P. 3.
31. Satyarthi J.K., Srinivas D., Ratnasamy P. Estimation of free fatty acid content in oils, fats, and biodiesel by <sup>1</sup>H NMR spectroscopy // Energy & Fuels. –2009. № 23 (4). pp. 2273-2277.

32. Shu-Guo Li, Hui Zhang, Wen-Tong Xue. A novel method for the determination of acid value of vegetable oils // *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2007. № 109. pp. 1088-1094.
33. Takamura Y.. Determination of free fatty acids and insoluble impurities in crude fats and oils by the conductometric method // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1990.
34. Tubino M., Aricetti J. A. A green potentiometric method for determination of the acid number of oils and fats // *J. Braz. Chem. Soc.*, 2013. Vol. 24. № 10. pp. 1691-1696.
35. Wen Y.Q., Xia X.J., Hu Z.J., Lin R.H. Lipid chemistry, contents and fatty acid composition in rice grains // *Food Chemistry*. 2013.
36. Xiuzhu Y., Chen Y., Shuangkui D., Jin-ming G. A new method for determining free fatty acid content in edible oils by using electrical conductivity // *Food Analytical Methods*. 2012. № 5(6). pp. 1453-1458.

### **Methods for determining the acid number of grain fat and its processed products**

#### **Artyom V. Yaitskikh**

Candidate of Technical Sciences  
V.M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems  
Moscow, Russia  
microbiolab@mail.ru  
ORCID 0000-0003-1302-0951

#### **Lyudmila V. Vanina**

Candidate of Chemical Sciences at the Institute of Grain and Products of its Processing  
V.M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems  
Moscow, Russia  
l.vanina@fncps.ru  
ORCID 0000-0002-9498-4885

#### **Antonina S. Tsygarkina**

Research Engineer at the Research Institute of Grain and its Processed Products  
V.M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems  
Moscow, Russia  
chygarkina@fncps.ru  
ORCID 0009-0006-2298-708X

Received 01.11.2023

Accepted 20.12.2023

Published 15.02.2024

UDC 664.3.033.6

EDN GXZOHM

VAK 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

#### **Abstract**

This article presents a review of the main methods for determining the acid number of fat in grain and its processing products, which are used in our country – from well-known accepted to the latest. Their analysis and systematization are carried out, the main advantages and disadvantages are highlighted, based on economic efficiency, ease of use, and objectivity of the results obtained. The article discusses various methods for determining the acid number of fat contained in grain and its processing products. The acid number is an

important indicator of the quality of fats, as it reflects their degree of oxidation and, accordingly, freshness and suitability for consumption. The authors analyze in detail classical and modern approaches to measuring this parameter, including titrimetric, spectrophotometric, and chromatographic methods. Special attention is given to comparing the accuracy, sensitivity, and convenience of using different techniques. The article emphasizes that the choice of method for determining the acid number depends on the specifics of the sample, the required accuracy of measurements, and the available equipment. The authors also discuss the influence of storage conditions of grain and its processing products on the change in acid number, highlighting the importance of this parameter for assessing the quality of food products. In conclusion, the article presents recommendations for the optimal choice of analysis methods for different types of products. It also describes promising directions for the development of methods for determining the acid number, including the use of automated and high-throughput technologies. The research provides valuable information for specialists in the field of agrochemistry and the food industry, aiming to improve the quality and safety of their products.

### Keywords

acid number of fat, grain products, storage, fatty acids, enzymes, determination methods.

### References

1. GOST 31700-2012 Grain and products of its processing. A method for determining the acid number of fat. M.: Standartinform, 2013. 9 p.
2. GOST 31933-2012 Vegetable oils. Methods for determining the acid number. M.: Standartinform, 2014. 11 p.
3. GOST 33441-2015 Vegetable oils. Determination of quality and safety indicators by near-infrared spectroscopy. M.: Standartinform, 2016. 11 p.
4. GOST R 50457-92 Animal and vegetable fats and oils. Determination of acid number and acidity. M.: Standartinform, 2006. 7 p.
5. GOST R 51413-99 (ISO 7305-98) Grain processing products. Determination of the acid number of fat. M.: Standartinform, 2006. 9 p.
6. Byrd A.N., Voronova N.S., Nesterenko A.A. A software package for beginners // Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 105 p.
7. Bogatko N.M. The use of an improved method for the separation of acid-base fat in ground grain products in the veterinary and sanitary doctor // Researcher of the Lomonosov LNUVBT. S.Z. Gzhitsky. Vol. 16. 2014. № 3. P. 3. pp. 278-285.
8. Viktorova E.P. Development of a method for determining the acid number of oil contained in sunflower phospholipids based on the NMR method // New technologies. 2018. № 2. pp. 13-17.
9. Volobueva V.F., Novikov N.N., Seregina I.I., Khrunov A.A. Biochemical foundations of crop production quality. M.: Publishing House of the Russian State Agrarian University-MSHA, 2016. 238 p.
10. Vyskubova E.N. Electrochemical methods for determining the acid number of vegetable food and essential oils based on iodate-iodide redox system: abstract. ... dissertation of the Candidate of Chemical Sciences: 02.00.02. KubSTU. Krasnodar, 2000.
11. Kazakov E.D., Volkova A.N. Changes in the chemical composition and quality indicators of grain during long-term storage. In the book: Issues of long-term storage of grain and food products // Research Institute of GU GPR under the USSR Council of Ministers. Issue 2. M.: Publishing House, 1952. pp. 27-45.
12. Karaichev A.S. Development of a strategy for the development of grain production // Theory and practice of world science. 2017. № 9. pp. 80-82.
13. Lopachev E.A. Methods of assessing linseed oil by rancidity indicators // Actual problems of the humanities and natural sciences. 2011. pp. 13-14.
14. Makaseeva O.N., Tkachenko L.M. Lipids and their metabolism: Biological chemistry: consp. lek. Mogilev: Mogilev State University of Food, 2005. 48 p.
15. Maleeva O. L. Changing the quality of grain mass during storage // Sphere of services: innovations and quality. 2012. № 7. pp. 29-29.

16. Nefedieva E. E., Khramova Ya. I. Lipid degradation during seed storage // *Modern scientific research: problems and solutions*. 2020. pp. 20-23.
17. Priezzheva L.G., Shukhnov A.F. Method for determining the acid number of fat in grain processing products // *Food industry*. 2010. № 12. pp. 61-63.
18. Prudnikov, S.M. Zverev L.V., Agafonov O.S., Rusnak G.V. New possibilities of pulsed methods of nuclear magnetic resonance // *Collection of dokl. XV International Scientific and Practical Conference. «Fat and oil industry»*. 2015. pp. 10-11.
19. Ruvinsky O.E., Vyskubova E.N., Sharudina S.Ya. Redox-potentiometric measurement of the acid number of vegetable oils without titration // *News of universities. Food technology*. 2000. № 4. pp. 108-111.
20. Safronova T.N., Kazina V.V., Safronova K.V. Development of technological parameters of wheat grain germination // *Technique and technology of food production*. 2017. Vol. 44. № 1. pp. 37-43.
21. Smirnova N. I. Features of the methodology for determining the acid number in vegetable oils // *Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Fats*. 2012. № 2. p. 12.
22. Machesar S.A., Sherazi S.T.H., Khaskheli A.R. Analytical approaches to the assessment of the content of free fatty acids in oils and fats // *Royal Chemical Society*. 2014 No. 6. pp. 4956-4963.
23. Kristi U. U. Analysis of lipids // *Trends in food science. Technology*. 1996. Vol. 11. № 145. pp. 89452-0.
24. Harwood J.L. Acillipids of plants: structure, distribution and analysis. Ed. D.J. Murphy // *Plant lipids: biology, use and manipulation*. Wiley-Blackwell, 2005.
25. Mariotti E., Maschini M. Determination of the acidity of extra virgin olive oil by FIA titration // *Food chemistry*. 2001. № 73(2). pp. 235-238.
26. Mittal M., Venkateswaran G., Raghavarao K.S.M.S. Free fatty acids and their sensitive probes. Edited by S. Chandra, N. Sharma // *Biotechnology for sustainable agriculture*. Springer. 2020.
27. Murphy D.J. Biotechnological applications of seed biology // *Seed Biology: achievements and applications. Materials of the Sixth International Seminar on seeds*. Merida, Mexico, 1999. Wallingford, UK: CABI Publishing House, 2000. pp. 427-438.
28. Pupala V.S., Belgilali S.A., Singh S. Determination of total acidity in fats and oils: a comparative study of various methods // *International Journal of Nutritional Properties*. 2016.
29. Rao Yu., Xiang B., Zhou H., Wang Z., Xie S., Xu J. Quantitative and qualitative determination of the acidity of peanut butter using near-infrared spectrometry // *Journal of Food Engineering*. 2009. Volume 93. № 2. pp. 249-252.
30. Revised method for determining acidity in oils and fats // *Item 11 of the FSSAI Manual on Methods of food Analysis – Oils and Fats*. New Delhi: Food Safety and Standards Authority of India. 2018. p. 3.
31. Satyarthi J.K., Srinivas D., Ratnasamy P. Assessment of the content of free fatty acids in oils, fats and biodiesel by <sup>1</sup>H NMR spectroscopy // *Energy and fuel*. 2009. № 23 (4). pp. 2273-2277.
32. Shu-Guo Li, Hui Zhang, Wen-Tong Xue. A new method for determining the acidity of vegetable oils // *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2007. № 109. pp. 1088-1094.
33. Takamura Yu. Determination of the content of free fatty acids and insoluble impurities in crude fats and oils by the conductometric method // *Journal of the American Society of Petrochemicals*. 1990.
34. Tubino M., Arichetti J. A. Green's potentiometric method for determining the acid number of oils and fats // *J. Braz. Chemical Journal*, 2013. Volume 24. № 10. pp. 1691-1696.
35. Wen Yu.K., Xia H.J., Hu Z.J., Lin R.H. Chemistry of lipids, content and composition of fatty acids in rice grains // *Food chemistry*. 2013.
36. Xiuzhu Yu., Chen Yu., Shuangkui D., Jin-ming G. A new method for determining the content of free fatty acids in edible oils using electrical conductivity // *Methods of food analysis*. 2012. № 5(6). pp. 1453-1458.

## Подходы к модернизации энергетической промышленности для обеспечения развития цифровой экономики

**Илья Вадимович Самарин**

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Автоматизации технологических процессов  
Российский государственный университет нефти и газа НИУ им. И.М. Губкина

Москва, Россия

ivs@tpp.su

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 09.11.2023

Принята 25.12.2023

Опубликована 15.02.2024

УДК 621.3

EDN GYCMXQ

ВАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

### Аннотация

В эпоху цифровизации экономических процессов перед компаниями встает задача глубокой трансформации существующих стратегий распределения производственных ресурсов и методов прогнозирования спроса. Такое преобразование подразумевает переход к интеграции в единое информационное пространство, что, в свою очередь, позволяет существенно повысить точность и эффективность прогнозирования бизнес-активности. Данная трансформация становится краеугольным камнем в формировании устойчивого развития на уровне отдельных государств. Научная новизна данного исследования заключается в разработке методологии для создания унифицированной системы прогнозирования спроса на компоненты продукции в энергетической отрасли, включенной в общую энергетическую информационную систему. Авторы выделяют потенциал для оптимизации отдельных элементов и структур с целью усовершенствования передачи и обработки данных на множественных уровнях. Основной фокус исследования направлен на адаптацию энергетического сектора к условиям цифровой экономики через применение предиктивных алгоритмов потребления продукции. Значение исследования для практического применения обусловлено возможностью интеграции разработанных решений в процесс модернизации предприятий, участвующих в национальной производственной системе, в контексте широкомасштабной цифровизации экономических процессов. Как пример успешной реализации такого подхода приводится опыт, демонстрирующий практическую применимость и эффективность внедрения инновационных цифровых технологий в стандартные процедуры управления и прогнозирования в энергетической отрасли.

### Ключевые слова

энергия, промышленность, моделирование, прогнозирование, экономика.

### Введение

В эру цифровых трансформаций экономической сферы происходит не просто отказ от устаревших методик ведения бизнеса, заменяемых инновационными сервисами, но и заметное уменьшение операционных расходов за счет оптимизации трудозатрат. Такой подход исключает возможные препятствия к инновациям, связанные с человеческим фактором. Дигитализация экономики, таким образом, превращается в применение передовых технологий управления и эффективного обмена данными между участниками рынка (Hong, 2016).

В контексте энергетической отрасли ключевая задача заключается в синхронизации потребления энергии с действующими контрактами, заключенными с производителями (Zhou, 2013). При модернизации производства важно учитывать снижение потребления ресурсов добывающими компаниями, что предполагает пересмотр установленных договоренностей о поставках. Актуализация вопросов точного прогнозирования поставок, включая первичные энергоресурсы, становится неизбежной (Pesznyák, 2007). Однако оценки, основанные исключительно на данных одного предприятия, не способны обеспечить достоверность прогнозов, подчеркивая необходимость разработки общенациональной стратегии потребления (Urbach, 2019).

В условиях экономических колебаний, спровоцированных переходом к производственному сектору, агентный метод прогнозирования выделяется своей актуальностью (Bieser, 2018). Этот подход базируется на детально разработанных стандартах для различных услуг и производственных процессов, таких как отопление, вентиляция, водоснабжение, освещение и обеспечение энергоэффективности зданий, в том числе строительных норм и стандартов (Varela, 2018). Отдельные сектора производства подпадают под строгие нормативы использования ресурсов для создания конечных товаров (Traunmüller, 2017).

Затраты энергии на производство товаров могут варьироваться в зависимости от используемых технологий, причем существует тенденция к их снижению при переходе к более продвинутым и эффективным методам. В качестве индикаторов энергетической эффективности выступают такие параметры, как энергоемкость валового внутреннего продукта (ВВП), энергоемкость валовой добавленной стоимости (ВДС) и энергоемкость конкретной продукции, учитывая возможности для сокращения энергопотребления. Наш прогностический подход классифицируется как нормативно-целевой, предполагая установление определенных стандартов энергоемкости ВВП, НДС или производства отдельных товаров и услуг. Это включает в себя регулирование удельных затрат энергии на различных уровнях иерархии с целью не только соблюдения стандартов производства и предоставления услуг, но и внедрения мер по повышению энергоэффективности и минимизации использования дефицитных энергоресурсов (Salminen, 2017).

Не менее важным является учет особенностей современного экономического планирования, главной целью которого является генерация дополнительного продукта и прибавочной стоимости на разных уровнях кооперации. В контексте глобализации экономики стратегии прогнозирования должны способствовать выявлению перспективных направлений индустриального развития и предварительному заключению контрактов на поставку необходимых мощностей (Wittmann, 2017). При этом требуется модернизация подходов к учету экологических аспектов, направленных на сокращение потребления энергетических ресурсов и одновременное повышение производительности промышленности. Особое внимание следует уделить анализу энергопотребления населением, где действуют особые тарифы, часто используемые для перекрестного субсидирования.

В исследовании, выполненном Ли Хуйяном, Хайей Салах и Зиангом Чжаном (Li, 2017), был подробно изучен метод прогнозирования потребления энергетических ресурсов и электроэнергии в контексте структурных изменений экономики. Авторы утверждают о наличии непосредственной корреляции между уровнем потребления энергии и непрерывным ростом валового внутреннего продукта, подчеркивая прямую зависимость между динамикой экономического развития и объемами энергопотребления. Они рассматривают сокращение энергозатрат на единицу продукции как ключевой показатель экономической эффективности, подчеркивая, что низкая энергоемкость производства способствует увеличению прибыли и укреплению конкурентоспособности продукции без дополнительных государственных субсидий. Тем не менее, данная модель применима преимущественно к отраслям массового производства, располагающимся внутри насыщенных рынков и не требующим нового позиционирования. Она не учитывает специфику стратегически значимых секторов экономики, где высокая энергоемкость нередко связана с вопросами национальной безопасности и суверенитета.

В свою очередь, Вэй-Цзян Хонг (Hong, 2017) в своем исследовании представил результаты использования двухуровневого подхода к прогнозированию потребления энергии, учитывающего

возможности энергосбережения, вытекающие из структурных трансформаций экономики. Он акцентировал внимание на важности привязки производственных процессов к источникам энергии, предлагая, чтобы энергоемкость продукции соответствовала рыночным ценам на энергоресурсы, особенно в условиях государств, зависящих от импорта энергии и использующих ее в основном для нужд населения (Агун, 2018). Этот подход подчеркивает необходимость более тесной связи между энергетической структурой и экономическими процессами, особенно в контексте стран с высокой долей импорта энергоресурсов.

В аналитическом обзоре Рольфа Фришкнехта (Frischknecht, 2018) поднимается вопрос о прогнозировании конечного потребления топливно-энергетических ресурсов, дополняя его анализ потребления для энергетических целей, включая неэнергетические расходы и потери. Автор настаивает, что задача государства не столько в ограничении использования внешних энергоресурсов или их приобретении по сниженным ценам, сколько в оптимизации использования доступных ресурсов и минимизации неизбежных потерь, возникающих не столько из-за действий конечных пользователей, сколько из-за недостатков в технологиях. Проблема, по мнению Фришкнехта, лежит в плоскости хозяйственной деятельности и может быть решена за счет простых технологических усовершенствований, финансируемых из внутренних резервов предприятий, особо подчеркивая значение индивидуального подхода к развитию технологий, где возможности сокращения потерь встраиваются в систему как сервис.

Трактовка конечного потребления топлива, описанная в работе Чоудхури (Choudhury, 2018), охватывает использование топлива во всех аспектах потребления, за исключением его переработки в другие виды энергии или неэнергетических целей. Этот анализ подчеркивает, что вопросы интеграции нетрадиционных источников энергии остаются открытыми, поскольку их потенциал в настоящее время реализуется лишь частично и не способен в полной мере удовлетворить потребности промышленности из-за отсутствия необходимых устойчивых мощностей. Считается, что такие источники следует рассматривать как часть потребительского сегмента рынка энергоресурсов, и их вклад в спрос на энергию не должен игнорироваться в официальной статистике.

В контексте различных методик составления энергетических балансов, как указано в исследованиях Хайята (Khayyat, 2018), включение неэнергетического использования ресурсов, как это принято в Международном энергетическом агентстве (МЭА), или учет потерь, по методике Евростата, отражает разнообразие подходов к определению конечного потребления. Кроме того, в системе национальных счетов (СНС) выделяются «категории конечного использования ВВП по функциональным классификациям», включающие расходы домашних хозяйств, расходы государственного сектора и некоммерческих организаций, обслуживающих домашние хозяйства, что демонстрирует многоуровневость и сложность в определении конечного потребления энергоресурсов в экономике (Beaumont, 1982).

Согласие с теорией Джона Бомонта, выдвинутой еще в 1982 году относительно применения симуляционных моделей для анализа энергообеспеченности крупных государств, находит подтверждение в современной практике учета и исполнения международных энергетических соглашений, применимых в различных странах. Для РФ, как для государства, исторически связанного с практиками директивного планирования в рамках социалистического лагеря, данный метод особенно актуален.

В финансовом аспекте категория конечного потребления включает в себя траты домохозяйств, расходы государственного аппарата и некоммерческих организаций, направленные на обслуживание населения. В энергетической же плоскости конечное потребление охватывает все сферы экономической деятельности и жизнедеятельности граждан (Soares, 2016). Разделение потребления электричества и тепла на производственные и бытовые нужды демонстрирует необходимость выработки интегрированного восприятия энергопотребления, способствующего росту спроса как в потребительском секторе, так и среди юридических лиц и предприятий, обеспечивающих инфраструктурное развитие и реализацию масштабных стратегий регионального усовершенствования.

Подход, основанный на глубоком анализе долгосрочной динамики энергопотребления, способен обеспечить целесообразное и экономически оправданное использование энергетических ресурсов.

Необходимо создать систему, способную анализировать взаимодействие между промышленным сектором и частными потребителями в контексте их энергопотребления, выявляя пути минимизации нецелесообразного использования энергетических ресурсов и исследуя возможности для всестороннего управления этим процессом. Мы убеждены в целесообразности применения агентно-ориентированного моделирования, которое способно обеспечить комплексную реализацию инициатив, направленных на стимулирование экономического прогресса на уровне государства. В свете этого, агентное моделирование предполагает разработку масштабных программ развития, основанных на сценарном планировании. Это, в свою очередь, подразумевает определение и систематизацию исследовательских методик.

### Материалы и методы исследования

Интеграция концепций цифровой трансформации и эволюции производственного сектора привела к формированию определения потребления энергетических ресурсов, которое будет применяться в данной работе. Под этим понимается общий объем использования энергии, включая ее преобразование и потери. Конечным потреблением считается использование энергоресурсов домашними хозяйствами, а также секторами, связанными с государственным управлением и обороной, обязательным социальным страхованием и деятельностью домашних хозяйств (San Martin, 2017). В частности, использование угля или природного газа в нагревательных устройствах промышленного назначения мы относим к категории расходов на преобразование топлива в другие формы энергии (например, в тепловую). Такой подход к определению конечного потребления накладывает необходимость методических корректировок при анализе потенциала для энергосбережения в контексте структурных сдвигов в экономике и прогнозирования энергопотребления в свете этих изменений (Liu, 2016).

Относительно различных секторов экономической деятельности, исключая секцию D, касающуюся поставок электроэнергии, газа, пара и услуг по кондиционированию воздуха, прогнозные уровни потребления разнообразных видов топлива и энергии определяются на основе специфической формулы:

$$E_{ij}^{tl} = \sum_i e_{VDVij}^b V_{VDVi}^{tl} \pm \sum_i \Delta e_{ij}^{b-tl} V_{VDVi}^t - \sum_{i=1}^I \Delta e_{ij}^{tl} V_{VDVi}^{tl} \pm E_{zami}^{tl} \quad (1)$$

где  $e_{VDVij}^b$  – угле-, газо-, электроемкость VDVj – вида топлива или энергии в базовом году и сектора экономики (укрупненного вида экономической деятельности), определяется по формуле:

$$e_{VDVij}^b = P_{ij}^b / V_{VDVi}^b \quad (2)$$

где  $P_{ij}^b$  – объем потребления j-вида топлива или энергии i-сектором экономики в базовом году;

$V_{VDVi}^b$  – объем VDV, созданного в i-секторе экономики за базовый год;

$V_{VDVi}^{tl}$  – прогнозные объемы VDV i-сектора экономики в постоянных ценах (приведенных к ценам базового года);

$\Delta e_{ij}^{b-tl}$  – изменение энергоемкости VDV j-вида топлива или энергии i-сектора экономики от изменения прогнозной структуры валовой добавленной стоимости, которая исчисляется по методике, разработанной нами ранее;

$\Delta e_{ij}^{tl}$  – снижение энергоемкости VDV j-вида топлива или энергии при внедрении мероприятий по энергосбережению в технологиях в году tl, относящихся по виду деятельности к сектору i;

$E_{замj}^{tl}$  – объемы возможного замещения j-вида топлива или энергии в прогнозном году tl.

Для секции D прогнозные уровни потребления топлива (угля, природного газа) определялись в зависимости от прогнозной структуры электро- и теплогенерирующих источников и прогнозной потребности экономики в электрической и тепловой энергии:

$$E_{jD}^{tl} = \sum_{l=1}^n Bw_{fj}^{tl} + \sum_{m=1}^n Bq_{mj}^{tl} + \sum B e_{inj}^{tl} = k_{lj} w_f^{tl} b_{wj}^{tl} + k_{mj} q_m^{tl} b_{qi}^{tl} + k_{inj} b_{in}^{tl} \quad (3)$$

где  $E_{jD}^{tl}$  – потребность в j-виде топлива для систем электроснабжения, теплоснабжения, газоснабжения и др. (секция D по ВЭД);

$Bw_{fj}^{tl}$  – расход j-вида топлива на электрогенерацию f-типа (ТЭС, ТЭЦ, др. электрогенераторы на органическом топливе) в прогнозном году tl;

$Bq_{mj}^{tl}$  – расходы j-того вида топлива на теплогенерацию m-типа (ТЭС, ТЭЦ, др. теплогенератор на органическом топливе) в прогнозном году tl;

$\sum B e_{inj}^{tl}$  – другие потребности j-вида топлива в секции D (газоснабжение, поставка кондиционированного воздуха);

$k_{lj}$  – доля электроэнергии, произведенная электрогенерирующими мощностями с использованием j-вида топлива;

$w_f^{tl}$  – объем электроэнергии-брутто, выработанной электрогенерирующими мощностями f-типа в году tl;

$b_{wj}^{tl}$  – удельные расходы j-того вида топлива на производство электроэнергии в энергосистеме в tl году;

$k_{mj}$  – доля тепловой энергии, произведенная теплогенерирующими мощностями с использованием j-вида топлива;

$q_m^{tl}$  – объем тепловой энергии, производимой теплогенерирующими мощностями m-типа в году;

$b_{qi}^{tl}$  – удельные расходы j-того вида топлива на производство тепловой энергии в системе централизованного теплоснабжения в tl году;

$k_{inj}$  – доля j-вида топлива, используемая в секции D на другие нужды;

$b_{in}^{tl}$  – расход органического топлива на другие нужды в секции D в tl году.

Оценка прогнозных уровней использования топлива и электроэнергии на макроуровне (ТОР-уровень) строится на основе формул (1)–(3), которые интегрируют предварительные оценки энергоемкости валовой добавленной стоимости (ВДС) страны и общего объема ВДС. Это обусловлено различной долей участия населения в потреблении отдельных видов энергоресурсов, что, в свою очередь, оказывает разнонаправленное влияние на общий объем потребления. Например, доля угля, используемого населением, составляет лишь 1% от его общего потребления, тогда как в случае с природным газом эта доля достигает 30%.

$$e_{VVP}^{it} = \frac{\sum E_{ij}^{it} + E_{jd}^{it}}{V_{VVP}^{it}} \quad (4)$$

Прогнозирование на уровне всей страны (ТОР-уровень) также может основываться на оценках энергоемкости валового внутреннего продукта (ВВП), где при расчете (в числителе) не принимается во внимание потребление энергии населением. Компоненты числителя вычисляются согласно формулам (1) и (3), а в качестве знаменателя выступает прогнозируемый ВВП страны за соответствующий год.

В контексте валовой добавленной стоимости (ВДС) в отличие от ВВП, налоги и субсидии, которые не связаны с энергопотреблением, остаются за рамками учета, делая расчеты прогнозов на верхнем и нижнем уровнях более точными, если они базируются на показателях НДС и соответствующей ей энергоемкости. Для достижения максимальной точности, прогнозы, сформированные на обоих уровнях, подвергаются дополнительной корректировке с использованием комплексного подхода. Однако, предложенная методика находит свои ограничения в случаях, когда необходимо синхронизировать прогнозы на уровне страны и по видам экономической деятельности без учета ранее включенного в анализ потребления населения как отдельного экономического сектора.

В соответствии с принятой методикой, на первом этапе формируются прогнозы потребления энергетических ресурсов как на общегосударственном (ТОР), так и на отраслевом (DOWN) уровне, применяя нормативно-целевой подход (с использованием формул (1)–(4)). На каждом этапе прогнозного периода (t) создается вектор показателей потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), исходя из предполагаемых значений ВВП и НДС:

$$F(t_l) = [F_T(t_l), F_{d1}(t_l), F_{d2}(t_l), \dots, F_{dn-1}(t_l)] \quad (5)$$

где  $F_T(t_l)$  – прогноз энергопотребления ТОР- уровня для заданного показателя ВВП на этапе  $t = t_l$ ;

$F_{di}(t_l)$  – прогноз энергопотребления i-сектора (вида экономической деятельности согласно классификатору ВЭД) DOWN-уровня для заданного показателя НДС на этапе  $t = t_l$ ;  $i = 1, n - 1$ .

После формирования векторов прогнозных величин энергопотребления для выбранных лет определяется сумма секторальных показателей – прогноз потребления топлива или энергии по всем ВЭД:

$$F_d(t_l) = \sum_{i=1}^{n-1} F_{di}(t_l) \quad (6)$$

и разница между полученным показателем энергопотребления на уровне страны и суммой энергопотребление за ВЭД:

$$R(t_l) = F_T(t_l) - F_d(t_l) \quad (7)$$

После этого секторальные прогнозы энергопотребления, входящих в выходной вектор  $F_{di}(t_l)$  из уравнения (5), агрегируются путем объединения видов экономической деятельности в укрупненные секторы и определяется их минимальное количество:

$$k(t_l) = \frac{F_d(t_l)}{F_{di}(t_l)_{\max}} \quad (8)$$

где, кроме указанных выше величин,  $F_{di}(t_l)_{\max}$  - наибольшее по значению энергопотребление i-видов экономической деятельности.

Величина  $k(t_l)$ , как правило, является нецелым числом. В дальнейших расчетах используется целая часть  $[k(t_l)]$  и остаток:

$$\Delta n(t_l) = k(t_l) - [k(t_l)] \quad (9)$$

С использованием коэффициента (8) определяются минимальная и максимальная размерность секторов, в которые объединяются укрупненные ВЭД, с учетом уравнения для TOP-уровня:

$$n_{\min}(t_l) = [k(t_l)] + 1 \quad (10)$$

$$n_{\max}(t_l) = n_{\min}(t_l) + 1 \quad (11)$$

Уточненным показателем, который обеспечивает совпадение показателей энергопотребления TOP- и DOWN-уровней, является такое уравнение:

$$Y_t(t_l) = F_t(t_l) - S(n(t_l))R(t_l) \quad (12)$$

в котором используется константа  $S(n(t_l))$ , протабулированная до  $n = 20$ , значение которой приведено, и величина  $R(t_l)$ , рассчитываемая по выражению (7).

С использованием уравнения (12) рассчитываются уточняющие показатели:  $Y_t(t_l, n_{\min}(t_l))$  и  $Y_t(t_l, n_{\max}(t_l))$ , и потом в случае нецелых значений – окончательное значение показателя энергопотребления TOP-уровня:

$$Y_t(t_l) = Y_t(t_l, n_{\min}(t_l))(1 - \Delta n(t_l)) + Y_t(t_l, n_{\max}(t_l))\Delta n(t_l) \quad (13)$$

Значения всех показателей энергопотребления DOWN-уровня определяются по зависимости:

$$Y_{di}(t_l) = q(t_l)F_{di}(t_l) \quad (14)$$

где коэффициент  $q(t_l)$ , уточняющий значение уровней потребления по ВЭД, вычисляется по формуле:

$$q(t_l) = \frac{Y_t(t_l)}{F_{di}(t_l)}, i = 1, n - 1 \quad (15)$$

$F_{di}(t_l)$  – прогнозное значение потребления топлива или энергии в период  $t_l$ .

Отдельно определяется прогноз потребления топлива и электроэнергии для населения по следующей зависимости:

$$P_j^{tl} = (b_j^b - \Delta b_j^{tl})N^{tl} \pm E_j^{tl} \quad (16)$$

Где  $b_j^b$  – удельные затраты  $j$ -вида топлива или энергии, потребленных населением в базовом году;

$\Delta b_j^{tl}$  – снижение удельных затрат  $j$ -вида топлива при условии внедрения энергосберегающих мероприятий в домохозяйствах в году  $t_l$ ;

$N^{tl}$  – прогнозная численность населения;

$E_j^{tl}$  – объемы возможного замещения  $j$ -вида топлива или энергии более дешевыми в домохозяйствах в прогнозном году  $t_l$ .

Наш метод интегрирует анализ цен на энергетические ресурсы с моделированием действий как поставщиков энергии, так и основных потребителей — электростанций, отопительных станций, промышленных предприятий, транспортного сектора и домохозяйств — основываясь на динамике цен и потенциальных ограничениях поставок энергоресурсов в регион. Эта модель была отобрана экспертами из Института экономики Сибирского отделения Российской академии наук для прогнозирования потребления энергии по регионам России (Гальперова, 2018) и показала свою эффективность, успешно реализовавшись в 87% случаев.

Для решения этой задачи разработана система, включающая модель прогнозирования цен на топливо и серию Имитационных Стохастических Статических Моделей (ИССМ) для различных потребительских групп. Эти модели объединяют в себе оптимизационные подходы и методы статистического анализа, в частности метод Монте-Карло, позволяющий учитывать неопределенность будущих условий. Модели характеризуются применением различных распределений для оценки вероятности показателей в заданном диапазоне, определяемых экспертным путем (равномерное, нормальное, логнормальное распределение и т.д.). В моделях учитывается «потребительский эффект», то есть как тип и качество топлива влияют на технико-экономические характеристики потребления, а также потенциальные изменения в производственных технологиях и использовании топлива, включая возможные ограничения на поставку различных видов топлива в регион.

### Результаты и обсуждение

Применяя детализированный подход к оценке будущего потребления топливных ресурсов и энергии, а также разработанную алгоритмическую модель, были составлены прогнозы использования электроэнергии, природного газа и угля. При этом особое внимание уделено оценке возможностей для снижения энергопотребления, связанных со структурными изменениями и внедрением новых технологий. Ожидаемый эффект от энергосбережения был интегрирован в расчеты будущих потребностей в энергии.

В разбивке по секторам потребления электроэнергии наибольшую часть занимает промышленность (43-63%), однако за период с 2001 по 2018 год наблюдалось уменьшение ее доли на 13%. Доля потребления электроэнергии домохозяйствами, напротив, увеличилась с 15,8% до 30,7%. Также заметен рост использования электроэнергии в других видах экономической деятельности с 7,5% до 17,7%, в то время как в транспорте зафиксировано небольшое сокращение с 6,4% до 5,7%. Доля строительства в общем объеме потребления осталась неизменной – 0,6%, а сельское хозяйство показало уменьшение с 3,1% до 2,8%.

Расчет потребления электроэнергии на национальном уровне осуществлен согласно упомянутой методике, включая формулы (1)–(4), прогнозы объемов валового внутреннего продукта (ВВП) и валовой добавленной стоимости (ВДС) по отраслям до 2040 года, а также учет электроемкости ВДС на основе данных за базовый 2018 год с прогнозируемыми мерами по энергосбережению. Ожидается, что общий объем потребления электроэнергии увеличится почти в 2,34 раза к 2040 году. С учетом энергосберегающих мер, связанных со структурными преобразованиями, предполагается рост в 2,12 раза, а при дополнительном учете технологических усовершенствований – вдвое при увеличении ВВП в 2,3 раза по сравнению с уровнем 2018 года.

Таблица 1. Текущий спрос на виды электроэнергии в среднем регионе РФ в 2018 г.

Показатель	2014	2015	2016	2017	2018
TOP-уровень нормативным методом (без населения)	46379,14	49870,04	52494,78	55845,51	57572,69
DOWN-уровень нормативным методом (без населения)	45458,08	49125,29	51970,68	55565,79	57572,18
TOP-уровень комплексным методом (без населения)	44556,11	48392,52	51452,73	55288,45	57572,69
DOWN-уровень комплексным	43671,27	47669,83	50939,04	55011,52	57572,18

методом (без населения), в т. ч. по секциям ВЭД					
сельское хозяйство	1739,478	1908,287	2049,405	2224,373	2339,61
добывающая промышленность	2185,627	2409,782	2600,99	2837,236	2999,22
перерабатывающая промышленность	22957,27	25438,93	27595,4	30253,14	32141,06
поставки электроэнергии, газа и т.д	7446,482	8292,904	9041,104	9961,668	10636,5
транспорт и др.	3269,629	3659,577	4009,8	4440,278	4764,9
другие ВЭД	3154,948	3548,963	3908,141	4349,453	4690,889
Потребление населением	16833,8	19031,3	21062,7	23558,92	25536
Валовое потребление по ВЭД и населению – нетто	53699,24	61014,25	67866,24	76290,78	83108,69
Валовое потребление по ВЭД и населению – брутто	66699,35	76166,09	85145,38	96195,83	105319,2
Экспорт	1572,074	1804,222	2027,059	2301,645	2532,6
Спрос на электроэнергию	65618,46	75686,77	85462,04	97526,42	107851,8

В рамках отдельных секторов экономической деятельности (ВЭД) возможности для сокращения энергопотребления за счет структурных изменений оценивались путем анализа динамики структуры экономики на протяжении прогнозного периода. Используя методику, описанную в пунктах (1)–(4), для каждой категории ВЭД был рассчитан потенциал энергосбережения, учитывая уже определенные возможности по сокращению энергопотребления в различных сферах экономической деятельности. Обобщая данные по каждому из агрегированных секторов, были получены результаты, отраженные в таблице 2, демонстрирующие совокупный потенциал энергосбережения на уровне ВЭД.

Таблица 2. Прогноз спроса на электроэнергию в среднем регионе РФ к 2040 г. с учетом структурного и технологического энергосбережения и экспорта, млн кВт/год

Показатель	2020	2025	2030	2035	2040
TOP-уровень нормативным методом (без населения)	64208,33	77234,79	86805,78	102744,3	115535,3
DOWN-уровень нормативным методом (без населения)	64548,24	74773,46	88079,47	104108,1	116584,6
TOP-уровень комплексным методом (без населения)	64353,49	76211,56	87323,78	103293,9	115958,3
DOWN-уровень комплексным методом (без населения), в т. ч. по секциям ВЭД	64353,48	76211,56	87323,78	103293,9	115958,3

сельское хозяйство	2679,425	3346,945	3992,919	4876,452	5553,912
добывающая промышленность	2834,419	3094,637	3452,064	3262,777	3547,467
перерабатывающая промышленность	34313,5	37783,81	40066,58	45986,07	51666,03
поставки электроэнергии, газа и т.д	13399,34	17884,85	22270,41	27277,54	31226,69
транспорт и др.	5681,998	7457,66	9488,906	11894,49	12600,88
другие ВЭД	5444,803	6643,644	8052,905	9996,567	11363,32
Потребление населением	24551,59	23567,25	22582,84	22524,95	22524,95
Валовое потребление по ВЭД и населению – нетто	91009,31	102514,4	112852	128975,1	141850,2
Валовое потребление по ВЭД и населению – брутто	114671,7	128143,1	139936,5	158639,5	173057,3
Экспорт	6300	8400	11200	12600	14000
Спрос на электроэнергию	120971,7	136543,1	151136,5	171239,5	187057,3

Применение усовершенствованного методологического подхода для оценки будущего спроса на топливо и энергию обеспечило расчет прогнозных показателей потребления электричества, газа и угля, учитывая эффективность, связанную с изменениями в структуре и технологиях экономики. В результате было выявлено, что различия между оценками на макро- и микроуровнях не превышают 3%. При помощи комплексного прогностического метода, реализованного через специально разработанную математическую модель, были получены данные о потреблении электроэнергии, используя серию уравнений (5)–(15), которые продемонстрировали высокую степень согласованности результатов, полученных на различных иерархических уровнях. Дополнительно к этому координированному прогнозу были добавлены оценки потребления электроэнергии населением до 2040 года, основанные на прогнозах демографического развития и предполагаемых мерах по повышению энергоэффективности (например, замена бытовой техники на более современные и эффективные модели). Обобщенные данные (чистое потребление) были интегрированы с учетом уровней потребления по ВЭД и демографическим показателям. Далее были учтены потери электроэнергии в процессе транспортировки через магистральные и межгосударственные сети, в распределительных сетях и на внутренние нужды, определяя таким образом общий спрос на электроэнергию в виде брутто-потребления. Затем были рассмотрены объемы экспорта электроэнергии за рубеж, что позволило окончательно выявить общий спрос на электричество (см. табл. 2).

Анализ формы статистических наблюдений показал, что в 2018 году на превращение было использовано 34% природного газа от его общего потребления, 2,3% ушло на собственные нужды энергетического сектора, 9% использовалось не по энергетическому назначению, 16,6% составило конечное потребление, 35,6% было реализовано населению, а 1,95% потеряно.

При расчете будущего потребления природного газа были учтены следующие структурные сдвиги в экономике: рост доли ВДС сельского хозяйства на 1%, транспорта на 1,5%, других секторов ВЭД на 4% при одновременном уменьшении доли промышленности на 4,5%, включая добывающую промышленность на 2,2% и перерабатывающую на 3,3%. Такие структурные изменения предполагают экономию потребления газа до 2,2 млрд м<sup>3</sup> к 2040 году. Расчет потребления газа на национальном уровне был осуществлен согласно упомянутой методике, прогнозам по ВВП и ВДС с учетом ВЭД до 2040

года, газоемкости ВДС страны на базовый год, при учете структурных изменений и технологической эффективности. Прогноз потребления газа на уровне страны представлен в табл. 3.

Таблица 3. Прогноз спроса на природный газ в среднем регионе РФ до 2040 г. с учетом структурного и технологического энергосбережения, млн м<sup>3</sup>

Показатель	2020	2025	2030	2035	2040
TOP-уровень нормативным методом (без населения)	15894,65	17762,1	20314,52	23328,24	25941,74
DOWN-уровень нормативным методом (без населения)	15634,68	14820,65	14893,59	15743,35	17171,18
TOP-уровень комплексным методом (без населения)	15789,12	16610,55	18189,85	20321,53	22451,32
DOWN-уровень комплексным методом (без населения), в т. ч. по секциям ВЭД	15789,11	16610,55	18189,85	20321,53	22451,31
сельское хозяйство	270,963	365,113	480,081	605,528	679,882
добывающая промышленность	1366,33	1564,269	1765,575	1998,171	2157,106
перерабатывающая промышленность	5585,433	6379,051	7439,481	8594,026	9608,921
Поставки электроэнергии, газа и т. д.	7198,03	6771,142	6723,367	7111,419	7889,588
транспорт	766,472	728,49	720,93	661,15	572,11
другие ВЭД	601,86	802,48	1060,43	1351,21	1543,71
Потребление населением	6470,1	6001,8	5590,2	5490,8	5418,7
Спрос на природный газ	22259,16	22612,38	23780,19	25812,29	27869,8

Применение доработанного подхода к оценке будущего потребления топливных ресурсов включало анализ энергосберегающего потенциала, основываясь на структурных изменениях и технологических инновациях в сфере экономической деятельности (ВЭД). Прогноз показал, что к 2025 году ожидается сокращение использования природного газа в отдельных ВЭД до 6,3 млрд кубометров, с последующим увеличением до 8,1 млрд кубометров к 2040 году. Также предвидится уменьшение потребления газа со стороны домохозяйств благодаря переходу на альтернативные источники энергии, установке более эффективного оборудования, улучшению теплоизоляции зданий и принятию других мер по повышению энергоэффективности. Ожидается, что после 2025 года потребление газа возрастет из-за роста промышленного производства, в то время как дальнейшее увеличение потребления газа населением не прогнозируется. Расчеты прогнозных уровней потребления газа по секторам экономики отражены в таблице 2.

Различие между верхними и нижними уровнями прогноза составило до 34%. Для достижения консенсуса между данными прогнозами применялся комплексный метод, обеспечивающий внушительную степень совпадения результатов, анализируемых на разных уровнях. В результате к согласованным данным было добавлено предполагаемое потребление газа населением, рассчитанное на основе демографических тенденций и мер по повышению энергоэффективности, а также перехода на электроэнергию и другие виды топлива. Сводные результаты представлены в таблице 2.

Согласно статистическому отчету «Использование энергетических ресурсов и продуктов переработки нефти за 2018 год», в среднем регионе РФ было использовано 15094,96 тыс. тонн угля, включая потери в размере 1,3 тыс. тонн. В детализации по ВЭД общий объем потерь составил 182,36 тыс. тонн, в том числе 181,2 тыс. тонн приходится на добывающую промышленность, а 1,3 тыс. тонн – на транспортировку и распределение в энергетическом секторе. В целом, с учетом всех направлений использования и потерь, общее потребление угля достигло 15276,2 тыс. тонн. Анализ структуры потребления угля показал, что основными его потребителями являются энергетический сектор (50-60%) и перерабатывающая промышленность (30-40%).

В анализе использования угля за 2018 год по ключевым секторам экономической деятельности выявлено, что 22,2% всего угля пришлось на коксующийся уголь. Основное применение, 83% от всего объема, нашло свое место в энергогенерации: на промышленных теплоэлектростанциях (ТЭС), теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) и в котельных сельскохозяйственного назначения, а также в секторах добывающей промышленности и других направлениях экономической деятельности. В сфере переработки, 99% угля по объему, задействованного в преобразовательных процессах (или 67% от общего потребления), пошло на коксование. Дополнительно, 32% от всего потребленного объема угля расходуется в промышленных печах металлургии (79%) и в производстве цемента (20,3%). Транспортный сектор использовал 37% угля для сжигания в котельных и 63% как топливо для «прочих нужд», согласно статистической отчетности. Доля угля, потребленного населением в 2018 году, составила 161,4 тыс. тонн, что эквивалентно 1% от общего объема потребления.

При формировании прогнозов уровней потребления угля были использованы данные об углеемкости валовой добавленной стоимости (ВДС) за 2018 год, прогнозы валового внутреннего продукта (ВВП) и ВДС до 2040 года, а также учет энергосберегающего потенциала, связанного со структурными и технологическими сдвигами. Анализ предполагаемых структурных изменений в экономике предвидит увеличение доли ВДС для аграрного сектора на 1%, транспорта на 1,5% и других отраслей на 4%, при снижении доли промышленного сектора на 4,5%, включая сокращение в добывающей промышленности на 2,2% и в перерабатывающей на 3,3%. Такая перестройка структуры предполагает снижение потребления угля на 10,4 миллиона тонн к 2040 году. Основываясь на актуальных данных об использовании угля и тенденциях изменения потребления за последние два года, были определены ключевые направления для сокращения потребления и оценены их потенциалы к 2040 году. Прогноз потребления угля в среднем регионе РФ на общегосударственном уровне к 2040 году представлен в таблице 4.

Таблица 4. Прогноз спроса на уголь в среднем регионе РФ к 2040 г. с учетом структурного и технологического энергосбережения, тыс. т

Показатель	2020	2025	2030	2035	2040
TOP-уровень нормативным методом (без населения)	34432,51	39700,5	46320,19	54421,5	61131,07
DOWN-уровень нормативным методом (без населения)	35131,5	31187,87	39855,41	47974,5	53343,64
TOP-уровень комплексным методом (без населения)	31365,07	35968,47	43401,38	51482,99	57582,36
DOWN-уровень комплексным методом (без населения), в т. ч. по секциям ВЭД	31365,08	35968,48	43401,37	51482,99	57582,36
сельское хозяйство	129,675	151,088	164,192	183,421	207,662

добывающая промышленность	549,185	513,359	488,026	351,225	323,022
перерабатывающая промышленность	13192,49	14289,18	14941,73	16888,09	9014,43
Поставки электроэнергии, газа и т. д	17202,92	20682,27	27433,18	33638,77	37593,73
транспорт	26,551	33,845	41,79	51,45	56,091
другие ВЭД	264,25	298,732	332,465	370,048	387,429
Потребление населением	281,75	254,73	226,94	214,27	200,2
Спрос на уголь	31646,86	36223,18	43628,34	51697,24	57782,55

Прогноз потребления угля по отраслям экономики был выполнен на основе данных об углеемкости валовой добавленной стоимости (ВДС) различных секторов за 2018 год, с учетом крупнейших потребителей, прогнозируемых показателей ВДС до 2040 года, а также оценки возможностей для сокращения потребления за счет структурных и технологических инноваций. Анализ мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности в различных секторах экономики, был представлен ранее. Потребление угля населением было рассчитано исходя из удельного расхода угля на одного человека в 2018 году, прогноза демографического развития и ожидаемого эффекта от внедрения энергосберегающих технологий. Учитывая намеченные тенденции и возможное замещение природного газа углем в промышленном и коммунально-бытовом секторах, был составлен прогноз использования угля до 2040 года для различных секторов экономики и населения.

Различия между оценками на макро- и микроуровне варьировались от 11 до 21%, что объясняется разнообразием подходов к расчетам на этих уровнях. Для достижения единообразия в прогнозах были применены математические методы. Следуя изложенной методике и применяя комплексный подход, было выполнено увязывание данных о потреблении угля, полученных с учетом макроэкономических индикаторов для страны в целом и отдельных видов экономической деятельности. Совпадение данных прогнозов оказалось очень высоким. К итоговым расчетам был добавлен прогноз потребления угля населением, дополняя тем самым согласованный общий прогноз.

Для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию концепция предусматривает ввод новых генерирующих мощностей в объеме порядка 10-12 ГВт к 2030 году, большая часть которых будет представлена высокоэффективными парогазовыми установками на природном газе и возобновляемыми источниками энергии. Доля последних в производстве электроэнергии к указанному сроку планируется на уровне 10% от совокупной выработки при оптимистичном сценарии развития отрасли. Такие масштабные инвестиционные проекты потребуют значительных капиталовложений, по предварительным оценкам, порядка 10-15 млрд долларов США.

Отдельный блок мероприятий в рамках государственной политики энергосбережения направлен на развитие института энергосервисных контрактов, позволяющих привлекать частные инвестиции в проекты по повышению энергоэффективности в бюджетном секторе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Механизм энергосервисных контрактов основан на возврате вложенных средств инвестора за счет полученной экономии энергоресурсов и призван стимулировать масштабное внедрение энергоэффективных технологий в социальной сфере и жилищном фонде.

Таким образом, долгосрочное прогнозирование спроса на энергоресурсы является неотъемлемой частью стратегического планирования развития энергетической отрасли и базируется на комплексном анализе макроэкономических тенденций, структурных сдвигов в экономике, демографических трендов, а также оценке потенциала применения энергоэффективных технологий и возобновляемых источников энергии. Точность и обоснованность таких прогнозов во многом определяет эффективность инвестиционных решений в электроэнергетике и смежных отраслях, а также позволяет своевременно выявлять и предотвращать возможные риски энергодефицита. В

Одним из ключевых направлений совершенствования системы энергетической статистики в является внедрение автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) в распределительных электросетевых компаниях. По состоянию на конец 2022 года, по данным Министерства энергетики, системами АСКУЭ было охвачено порядка 70% потребителей электроэнергии в стране, при этом в городах Астана и Алматы этот показатель достиг 95%. Планируется, что к 2025 году доля потребителей, обеспеченных приборами автоматизированного учета, превысит 90% в целом по республике.

Использование АСКУЭ позволяет не только повысить точность и оперативность сбора данных об электропотреблении, но и создает предпосылки для внедрения гибких тарифных планов и реализации механизмов управления спросом. По оценкам экспертов, экономия электроэнергии за счет оптимизации режимов потребления и сокращения коммерческих потерь при полномасштабном внедрении "умных" систем учета может составить до 10-15% от текущего уровня потребления. Внедрение систем онлайн-мониторинга на базе технологий промышленного интернета вещей (IIoT) открывает новые перспективы для повышения надежности и эффективности функционирования энергосистемы.

Ключевые прогнозные индикаторы развития энергетики среднего региона РФ к 2030 году включают:

1. Рост потребления первичных энергоресурсов на 30-35% по сравнению с уровнем 2020 года, до 115-120 млн тонн нефтяного эквивалента.
2. Увеличение доли природного газа в структуре энергопотребления с 20% до 25-30%.
3. Повышение удельного электропотребления на душу населения до 7500-8000 кВт·ч в год.
4. Ввод новых генерирующих мощностей в объеме 10-12 ГВт, в том числе на базе возобновляемых источников энергии.
5. Снижение энергоемкости ВВП на 30-35% по сравнению с уровнем 2020 года.

### **Заключение**

В данном исследовании осуществлена корректировка методологии оценки будущего спроса на энергетические ресурсы, включая переосмысление категории «конечного потребления» топлива и электроэнергии. Это привело к значительным изменениям в подходах к вычислению потенциала для сокращения энергопотребления, связанных со структурными трансформациями. Теперь необходимо учитывать будущую структуру генерирующих мощностей, детализацию секции «Транспорт», а также потребности в энергоресурсах, выделяя население как отдельную категорию потребителей с особой методикой прогнозирования, которая не участвует в первичных расчетах по уровням страны (TOP) и отдельных секторов экономики (DOWN), но интегрируется в итоговую оценку после гармонизации данных.

Разработаны усовершенствованные методы для прогнозирования потребления топлива и электроэнергии, опираясь на комплексный подход, и обновлены критерии для вычисления предполагаемого уровня потребления, используя нормативно-целевую методику. Анализ верхнего уровня спроса на энергию проводится через показатель энергоемкости ВДС страны, а нижний уровень – через агрегированные данные по потреблению топлива и электроэнергии в каждой сфере ВЭД, рассчитываемые на основе энергоемкости ВДС соответствующих секторов.

Затем, результаты подвергаются верификации с применением уточненного комплексного метода прогнозирования спроса, который особо отмечает этап согласования потребления энергии на уровне страны и по видам деятельности без учета потребления населением, добавляемого к итогам анализа отдельно. Этот подход позволяет отдельно учитывать динамику численности населения и тенденции в оснащении домохозяйств новейшими энергоэффективными приборами. На финальной стадии к результатам, полученным с помощью комплексного анализа, добавляется прогноз потребления энергии населением, и в итоговых данных учитывается прогнозируемый объем экспорта электроэнергии.

### Список литературы

1. Гальперова Е.В., Кононов Д.Ю., Мазурова О.В. Долгосрочное прогнозирование спроса на топливо на региональных энергетических рынках с учетом неопределенности // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление. 2018. № 1. С. 3-7.
2. Afonso Ó., Afonso S., Afonso I. Special Issue on energy economics: Demand, Prices and Welfare // Portuguese Economic Journal. 2016. Vol. 15(2). pp. 57-58.
3. Arun S.L., Selvan M.P. Smart residential energy management system for demand response in buildings with energy storage devices. *Frontiers in Energy*. 2018.
4. Beaumont J. A simulation model for U.K. energy demand // *Operational Research Society*. 1982. Vol. 33(6). 592 p.
5. Bieser J., Hilty L. An approach to assess indirect environmental effects of digitalization based on a time-use perspective. Ed. H.-J. Bungartz // *Advances and New Trends in Environmental Informatics*. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 67-78.
6. Csilla P., Zaránd P., Mayer A. Digitalization and networking of analog simulators and portal images // *Strahlentherapie und Onkologie*. 2007. Vol. 183(3). pp. 117-120.
7. Frischknecht R. Cumulative energy demand in LCA: The energy harvested approach // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2018. Vol. 20(7). pp. 957-969.
8. Hong W.-C. Evolutionary algorithms in SVR's parameter determination // *Intelligent Energy Demand Forecasting*, London: Springer London, 2016. pp. 41-92.
9. Ines V. Energy Is essential, but utilities? Digitalization: what does it mean for the energy sector? Ed. C. Linnhoff-Popien, R. Schneider, M. Zaddach // *Digital Marketplaces Unleashed*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. pp. 829-838.
10. Khayyat N.T. Production function models estimation // *Energy Demand in Industry: What Factors Are Important?* Dordrecht: Springer Netherlands, 2018. pp. 109-128.
11. Li Huiyang L., Haya Salah H., Zhang Z. Erratum to: consumer electric energy management strategies and preferences in emergency demand response: results from a survey. Ed. S.M. Cetiner, P. Fechtelkötter, M. Legatt // *Advances in Human Factors in Energy: Oil, Gas, Nuclear and Electric Power Industries*. Cham: Springer International Publishing, 2017. E1-E1.
12. Liu Y. Seasonal relationship of peak demand and energy impacts of energy efficiency measures // *A Review of Evidence in the Electric Energy Efficiency Programmes*. *Energy Efficiency*. 2016. Vol. 9(5). pp. 1015-1035.
13. Martin S., Pablo J., Garcia-Alegre M.-G., Guinea D. Reducing thermal energy demand in residential buildings under spanish climatic conditions: qualitative control strategies for massive shutter positioning // *Building Simulation*. 2017. Vol. 10(5). pp. 643-661.
14. Nils U., Ahlemann F. Digitalization as a risk: security and business continuity management are central cross-divisional functions of the company // *IT Management in the Digital Age: A Roadmap for the IT Department of the Future*, Cham: Springer International Publishing, 2019. pp. 85-92.
15. Salminen Vesa S., Ruohomaa H., Kantola J. Digitalization and Big Data supporting responsible business co-evolution. Ed. J.I. Kantola, T. Barath, S. Nazir, T. Andre // *Advances in Human Factors, Business Management, Training and Education*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 1055-1067.
16. Scheer A.-W. Theses on digitalization. Ed. F. Abolhassan // *The Drivers of Digital Transformation: why there's no way around the cloud*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 33-43.
17. Shibabrata Ch., Patra A.K., Parida A., Chatterjee S. Renewable energy capacity estimation for indian energy sector using energy demand forecasting through fuzzy time series. Ed. S. SenGupta, A.F. Zobia, K.S. Sherpa, A.K. Bhoi // *Advances in Smart Grid and Renewable Energy*. Singapore: Springer Singapore, 2018. pp. 551-558.
18. Traunmüller R. Digitalization as Challenge for Electronic government. Ed. A. Keho, E. Francesconi // *Electronic Government and the Information Systems Perspective*. Cham: Springer International Publishing, 2017. Vol. 3-8.

19. Wittmann J. Electrification and digitalization as disruptive trends: new perspectives for the automotive industry? In «Phantom Ex Machina: Digital Disruption's Role in Business Model Transformation». Ed. A. Khare, B. Stewart, R. Schatz. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 137-159.

20. Zhou Ji. Digitalization and intelligentization of manufacturing industry // *Advances in Manufacturing*. 2013. Vol. 1(1). pp. 1-7.

### **Approaches to the modernization of the energy industry to ensure the development of the digital economy**

**Ilya V. Samarin**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes

Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Moscow, Russia

ivs@tpp.su

ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 09.11.2023

Accepted 25.12.2023

Published 15.02.2024

UDC 621.3

EDN GYCMXQ

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

#### **Abstract**

In the era of digitalization of economic processes, companies face the task of deeply transforming existing production resource allocation strategies and demand forecasting methods. Such a transformation implies a transition to integration into a single information space, which, in turn, can significantly improve the accuracy and efficiency of forecasting business activity. This transformation is becoming a cornerstone in the formation of sustainable development at the level of individual States. The scientific novelty of this study lies in the development of a methodology for creating a unified system for forecasting demand for product components in the energy industry, included in the general energy information system. The authors highlight the potential for optimizing individual elements and structures in order to improve data transmission and processing at multiple levels. The main focus of the research is aimed at adapting the energy sector to the conditions of the digital economy through the use of predictive algorithms for product consumption. The importance of the research for practical application is due to the possibility of integrating the developed solutions into the modernization process of enterprises participating in the national production system in the context of large-scale digitalization of economic processes. As an example of the successful implementation of this approach, the experience of the Republic of Kazakhstan is presented, demonstrating the practical applicability and effectiveness of the introduction of innovative digital technologies into standard management and forecasting procedures in the energy industry.

#### **Keywords**

energy, industry, modeling, forecasting, economics.

## References

1. Galperova E.V., Konov D.Sh., Mazurova O.V. Long-term prognostic impact on the regional market, taking into account an unbiased // *Energy of Russia in the XXI century. Innovative development and management*. 2018. № 1. pp. 3-7.
2. Afonso O., Afonso S., Afonso I. Special issue on energy Economics: demand, prices and welfare // *Portuguese Economic Journal*. 2016. Vol. 15(2). pp. 57-58.
3. Arun S.L., Selvan M.P. Intelligent energy management system in residential premises to respond to demand in buildings with energy storage devices. *Frontiers in energy*. 2018.
4. Beaumont J. A simulation model of energy demand in the UK // *Society for Operational Research*. 1982. Vol. 33(6). 592 p
5. Bizer J., Hilty L. An approach to assessing the indirect environmental consequences of digitalization based on the assessment of time use. Edited by H.-J. Bungartz // *Achievements and new trends in environmental informatics*. Cham: Springer International Publishing House, 2018. pp. 67-78.
6. Chilla P., Zarand P., Mayer A. Digitization and creation of networks of analog simulators and portal images // *Drug therapy and oncology*. 2007. Vo. 183(3). pp. 117-120.
7. Frischknecht R. Aggregate energy demand in LCA: an approach based on energy collection // *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2018. Vol. 20(7). pp. 957-969.
8. Hong U.-S. Evolutionary algorithms for determining SVR parameters // *Intelligent forecasting of energy demand*, London: Springer London, 2016. pp. 41-92.
9. Ines V. Energy is needed, but utilities? Digitalization: What does this mean for the energy sector? Edited by K. Linnhoff-Popien, R. Schneider, M. Zaddah // *Digital Marketplaces Unleashed*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. pp. 829-838.
10. Hayat N. T. Evaluation of models of production functions // *Energy demand in industry: what factors are important?* Dordrecht: Springer, The Netherlands, 2018. pp. 109-128.
11. Li Huiyang L., Haya Salah H., Zhang Z. Correction to: Consumer strategies and preferences in the field of energy management in emergency response: survey results. Edited by S.M. Cetiner, P. Fechtelkotter, M. Legatt // *Achievements in the field of the human factor in the energy sector: oil, gas, nuclear and electric power industries*. Publishing house: Springer International Publishing, 2017. E1-E1.
12. Liu Yu. Seasonal interrelation of peak demand and energy consequences of energy efficiency measures // *Review of evidence in energy efficiency improvement programs in the electric power industry*. *Energy efficiency*. 2016. Vol. 9(5). pp. 1015-1035.
13. Martin S., Pablo H., Garcia-Alegre M.-G., Guinea D. Reducing the need for thermal energy in residential buildings in the climatic conditions of Spain: strategies for quality management of the placement of massive blinds // *Building modeling*. 2017. Vol. 10(5). pp. 643-661.
14. Niels W., Alemann F. Digitalization as a risk: managing security and business continuity - central intersectoral functions of a company // *IT management in the digital age: a roadmap for the IT department of the future*, Cham: Springer International Publishing, 2019. pp. 85-92.
15. Salminen Vesa S., Ruohomaa H., Kantola J. Digitalization and big data in support of responsible business development. I. Kantola, T. Barat, S. Nazir, T. Andre // *Achievements in the field of the human factor, business management, vocational training and education*. Cham: Springer International Publishing House, 2017. pp. 1055-1067.
16. Scheer A.-U. Abstracts on digitalization. Edited by F. Abolhassan // *The driving forces of digital transformation: why the cloud is not going anywhere*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 33-43.
17. Shibabrata Ch., Patra A.K., Parida A., Chatterjee S. Estimating the capacity of renewable energy sources for the Indian energy sector using forecasting energy demand using fuzzy time series. Ed. S. Sengupta, A.F. Zobia, K.S. Sherpa, A.K. Bhoj // *Achievements in the field of smart grids and renewable energy sources*. Singapore: Springer Singapore, 2018. pp. 551-558.
18. Traunmuller R. Digitalization as a challenge to e-government. Edited by A. Kehoe, E. Francesconi // *E-government and the prospects of information systems*. Cham: Springer International Publishing, 2017. Vol. 3-8.

19. Wittmann J. Electrification and digitalization as breakthrough trends: new perspectives for the automotive industry? In the book «The Phantom from the Machine: the role of digital technologies in the transformation of the business model». Ed. by A. Hare, B. Stewart, R. Shatz. Cham: Springer International Publishing House, 2017. pp. 137-159.

20. Zhou Ji. Digitalization and intellectualization of the manufacturing industry // Achievements in the manufacturing industry. 2013. Vol. 1(1). pp. 1-7.

**Исследование параметров процесса замораживания тестовых заготовок и хлебобулочных изделий различной степени готовности**

**Алексей Владимирович Лялин**

Независимый исследователь  
Российский биотехнологический университет  
Москва, Россия  
Novikova@mgupp.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

**Олег Алексеевич Феськов**

Независимый исследователь  
Российский биотехнологический университет  
Москва, Россия  
FeskovOA@mgupp.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

**Алла Николаевна Стрелюхина**

Независимый исследователь  
Российский биотехнологический университет  
Москва, Россия  
StrelyukhinaAN@mgupp.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

**Жанна Викторовна Новикова**

Независимый исследователь  
Российский биотехнологический университет  
Москва, Россия  
zh.novikova@mail.ru  
ORCID 0000-0001-8652-4777

Поступила в редакцию 04.11.2023

Принята 22.12.2023

Опубликована 15.02.2024

УДК 664.6

EDN HCWRRF

ВАК 4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

**Аннотация**

Целью данной работы явились экспериментальные исследования параметров процесса быстрого замораживания тестовых заготовок из пшеничной муки и ржано-пшенично смеси, обогащенных ягелем. В статье проведены экспериментальные исследования параметров процесса быстрого замораживания тестовых заготовок из пшеничной муки и ржано-пшенично смеси, обогащенных ягелем. Определены теплофизические характеристики тестовых заготовок и полуфабрикатов хлеба высокой степени готовности. Исследования выполнены на лабораторной экспериментальной установке на базе аппарата шокового замораживания Polair CR-5G. В процессе исследований получены значения температурного поля, теплового потока замораживаемых образцов, температуры и скорости циркуляции охлаждающего воздуха, средней скорости и продолжительности замораживания. Выполнена оценка

достоверности полученных результатов. Исследование теплофизических процессов, происходящих при замораживании, крио хранении и размораживании теста и полуфабрикатов хлебобулочных изделий высокой степени готовности имеет теоретическую практическую значимость разработки технологии приготовления хлебобулочных изделий с использованием шоковой заморозки. Полученные результаты исследований использовали для определения рациональных режимов проведения технологических процессов, разработку научно обоснованных технологических решений при создании технологии приготовления хлебобулочных изделий из замороженных полуфабрикатов.

#### **Ключевые слова**

тестовые заготовки, замораживание, теплофизические свойства, физико-химические свойства, обогащенные хлебобулочные изделия.

#### **Введение**

Хлебопекарная продукция занимает существенное место в рационе питания большей части населения нашей страны. За счет этих продуктов пищевой рацион обеспечивается по калорийности на 40 %, белками – на 50, углеводами – на 60 %. Это выдвигает вопрос обеспечения качества хлебопекарной продукции (КХП) на государственный уровень и требует создания системы взаимосвязанных процессов производства, начиная от обеспечения качества зерна и заканчивая реализацией готовой продукции населению (Стрелюхина, 2014).

Привлекательность быстрозамороженных хлебобулочных изделий обусловлена удобством как для производителя, так и для потребителя. Но технология для полуфабрикатов, шоковой заморозки и приготовления после хранения всегда индивидуальна и может значительно отличаться из-за их специфических характеристик. Криогенные технологии в производстве хлебобулочных изделий как традиционных, так и оригинальных сортов дают ряд преимуществ их использования: благодаря длительному сроку хранения в замороженном виде появляется возможность эффективно планировать производство, иметь товарный запас продукции, повысить рентабельность производства, увеличить коэффициент использования производственной мощности путем диверсификации ассортимента продукции хлебопекарного предприятия (Белявская, 2019).

Научно-обоснованный подход к изучению динамики изменения температуры в центре полуфабрикатов при замораживании и размораживании необходим для формирования высокого качества ржано-пшеничных и пшеничных полуфабрикатов высокой степени готовности и обеспечения качества готовых изделий.

#### **Материалы и методы исследования**

Исследования проведены на кафедре «Инженерия процессов, аппаратов, холодильной техники и технологий» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ». Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1, а общий вид его элементов – на рисунке 2 (а – г).

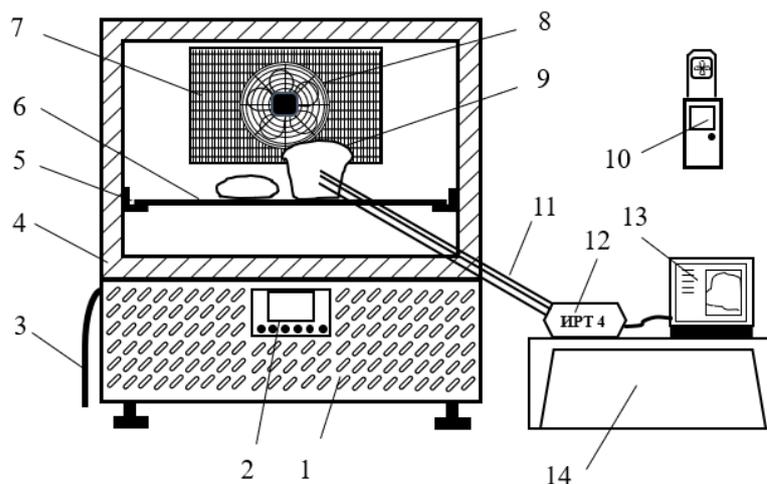


Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

На рисунке 1 показаны: 1 – аппарат шокового замораживания Polair CR-5G; 2 – контроллер; 3 – линия отвода талой воды; 4 – теплоизолированная камера; 5 – направляющие; 6 – противень; 7 – испаритель; 8 – вентилятор; 9 – исследуемые образцы; 10 – анемометр АПР-2; 11 – термопары и датчики тепловых потоков; 12 – прибор-измеритель температуры и тепловых потоков ИРТ-4; 13 – компьютер; 14 – стол с контрольно-измерительной аппаратурой.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2. Общий вид элементов экспериментального стенда

На рисунке 2 показаны: а – аппарат шокового замораживания Polair CR-5G; б – управляющий контроллер; в – измеритель температуры и тепловых потоков ИРТ-4; г – анемометр АПР-2.

Аппарат шокового замораживания Polair CR-5G функционирует в нескольких базовых режимах:

– шоковое охлаждение с завершением цикла по достижении нужной температуры внутри продукта (контроль температуры с помощью термощупа) и последующее хранение.

- шоковое охлаждение с завершением цикла по предустановленному времени и последующее хранение.
- шоковое замораживание с завершением цикла по достижении нужной температуры внутри продукта (контроль температуры с помощью термощупа) и последующее хранение.
- шоковое замораживание с завершением цикла по предустановленному времени и последующее хранение.

Стенд оснащен контрольно-измерительной системой, включающей измеритель температуры и плотности теплового потока ИРТ-4, компьютер и анемометр АПР-2. Прибор ИРТ-4 изготовлен в модификации «Измеритель» и оснащен четырьмя термоэлектрическими преобразователями и двумя датчиками тепловых потоков с удлинителями (рисунок 3), предназначенными для проведения измерений в условиях скороморозильной техники широкой номенклатуры.



Рисунок 3. Общий вид измерительных термопар и датчиков теплового потока

В качестве термоэлектрических преобразователей использованы хромель – алюмелевые термопары ХА (К) с диапазоном измерения температуры от -200 до +40 °С. Датчики теплового потока позволяют измерять плотность теплового потока в диапазоне от 0 до 10000 Вт/м. Анемометр АПР-2 позволяет измерять скорость потоков газообразных сред в диапазоне от 0,2 до 20 м/с, при этом погрешность измерений составляет  $\pm (0,1 + 0,05 \cdot V)$ ; V- значение измеряемой скорости.

Экспериментальные образцы теста и полуфабриката хлеба высокой степени готовности были приготовлены, согласно традиционной и разработанной (с добавками ягеля) рецептурам. Используются:

- тесто из пшеничной муки;
- тесто из пшеничной муки с добавлением ягеля;
- тесто из ржано-пшеничной муки с добавлением ягеля;
- хлеб формовой ржано-пшеничный с ягелем 85 % степени готовности;
- хлеб формовой пшеничный с ягелем 85 % степени готовности.

Тесто замораживали без предварительной расстойки, поскольку замораживание после расстойки неблагоприятно сказывается на формоустойчивости изделий и их внешнем виде после выпечки, которые приобретают расплывчатую форму, уплотненный мякиш, в них появляются пустоты на разрезе, имеют пониженный объем (Рощина, 2020).

Для измерения и контроля температурного и теплового поля замораживаемых образцов к ним подключали термопары и датчик, общий вид размещения которых представлен на рисунке 4 (а – г).

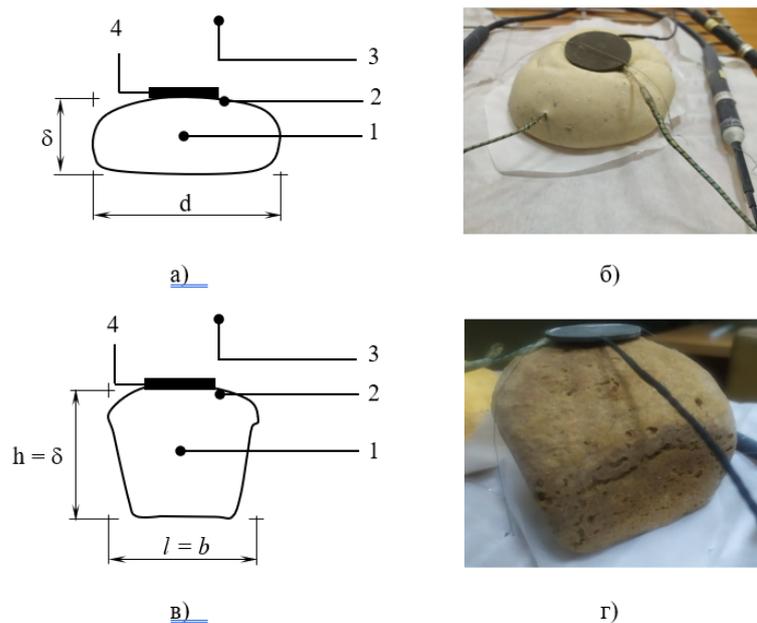


Рисунок 4. Схемы и общий вид подключения датчиков в образцах теста (а, б) и хлеба 85 % степени готовности (в, г)

На рисунке 4 показаны: 1 – термопара в центре продукта ( $t_{ц}$ ); 2 – термопара на поверхности продукта ( $t_{пов}$ ); 3 – термопара в охлаждающей среде – воздухе ( $t_{в}$ ); 4 – датчик плотности теплового потока ( $q_{пов}$ );  $d$  – диаметр образца;  $l$ ,  $b$ ,  $h$  – длина, ширина и высота образца;  $\delta$  – толщина образца.

Исследования проводили при режиме «шокового замораживания по времени» с рабочей температурой минус 40 °С и периодом цикла 240 мин. Период выхода установки на рабочий режим (захолаживание) составил 30 мин. Ход эксперимента постоянно отслеживался контрольно-измерительной системой с отображением на мониторе компьютера мгновенных значений с периодом записи  $\Delta\tau = 2$  сек.

В ходе эксперимента измеряли и контролировали следующие параметры:

- габаритные размеры образца  $d$ ,  $l$ ,  $b$ ,  $h$ ,  $\delta$ , м;
- начальная температура образца  $t_{н}$ , °С;
- температура воздуха внутри аппарата  $t_{в}$ , °С;
- скорость воздушного потока в зоне размещения образца  $\omega_{в}$ , м/с;
- температура в центре образца  $t_{ц}$ , °С;
- температура на поверхности образца  $t_{пов}$ , °С;
- плотность теплового потока с поверхности образца  $q_{пов}$ , Вт/м<sup>2</sup>;
- продолжительность процесса  $t$ , мин.

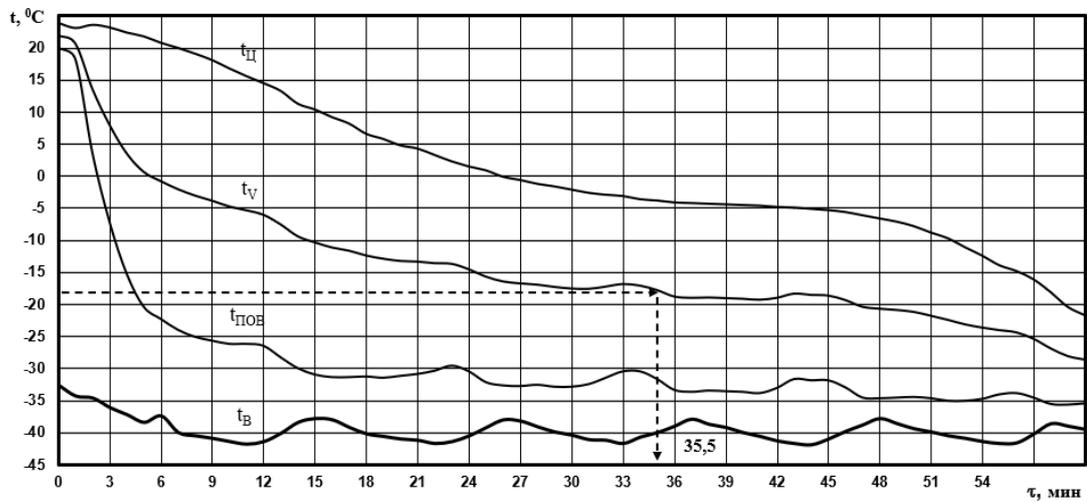
Наступление момента кристаллизации влаги в образцах определяли при достижении центром значения криоскопической температуры ( $t_{кр}$ ): для теста – на уровне  $-3,5 \div -9$  °С, для хлеба – на уровне  $-3,5 \div -4$  °С, в зависимости от рецептуры (Антонов, 2002).

Для последующего определения итоговой продолжительности замораживания ( $T_{эксп}$ ) до конечной среднеобъемной температуры  $t_v = -18$  °С и значений средней скорости замораживания (кристаллизации) ( $\omega_{ср}$ ), образцы продолжали замораживать, соблюдая условие, что температура в центре ( $t_{ц}$ ) должна достичь значения на 10 градусов ниже криоскопической ( $t_{кр}$ ).

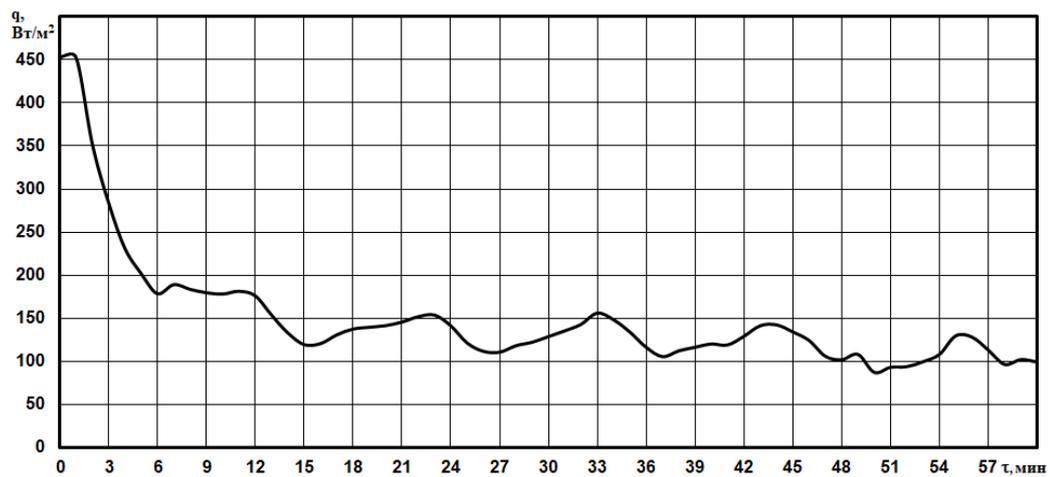
Весь массив точек статистики измеренных параметров обрабатывали с помощью специализированной программы Datarplotter (5), учитывая период записи показаний – 2 секунды, позволяющей воспроизводить графические зависимости вида  $t = f(\tau)$  и  $q = f(\tau)$ , а при обработке этих данных вида  $\alpha = f(\tau)$ , где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

### Результаты и обсуждение

Примеры распределения температуры (термограммы)  $t = f(\tau)$  и плотности теплового потока  $q = f(\tau)$  приведены на рисунках 5, 6 (а, б).

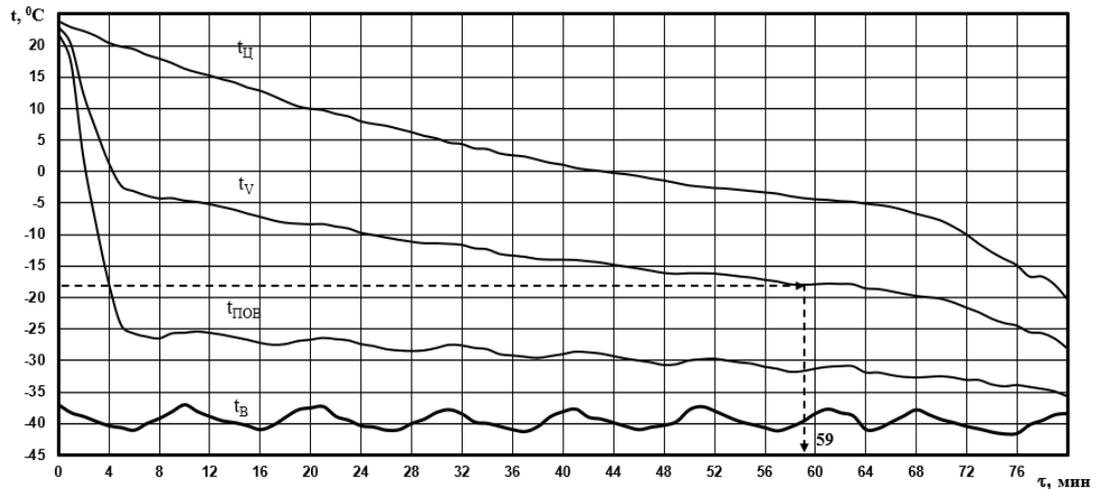


а)

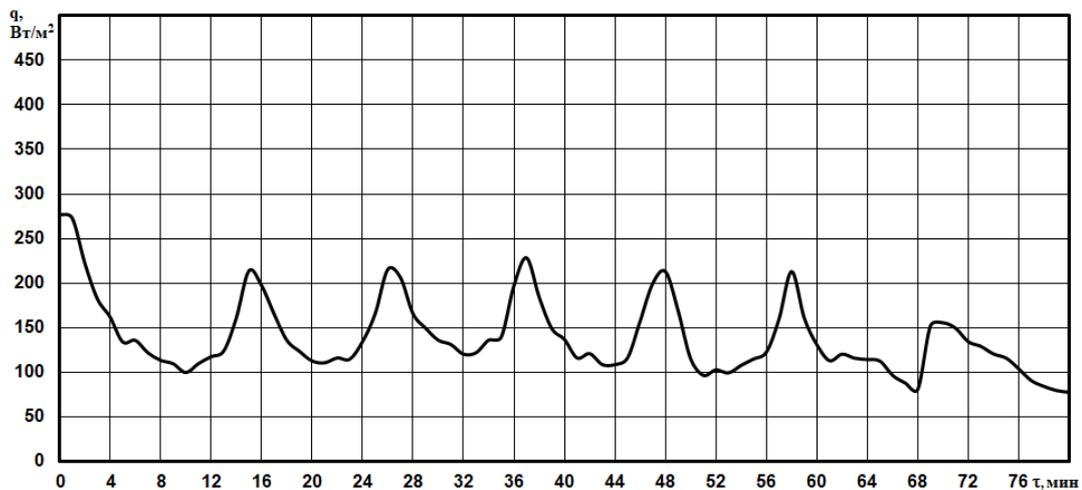


б)

Рисунок 5. Термограмма (а) и плотность теплового потока (б) при замораживании образцов теста из пшеничной муки с ягелем толщиной  $\delta = 0,04$  м и диаметром  $d = 0,09$  м при температуре воздуха  $t_{\text{в}} = -40$   $^\circ\text{C}$  и скорости его циркуляции  $\omega_{\text{в}} = 1$  м/с



а)



б)

Рисунок 6. Термограмма (а) и плотность теплового потока (б) при замораживании образцов полуфабриката высокой степени готовности хлеба формового ржано-пшеничного с ягелем толщиной (высотой)  $\delta = h = 0,07$  м, длиной  $l = 0,1$  м, шириной  $b = 0,1$  м при температуре воздуха  $t_{\text{в}} = -40$  °С и скорости его циркуляции  $\omega_{\text{в}} = 1$  м/с

Определение определении средней ( $\omega_{\text{ср}}$ ) и линейной ( $\omega_{\text{л}}$ ) скоростей замораживания позволило оценить характер процесса замораживания. Для этих целей использовали международный классификатор процессов замораживания по скорости замораживания (кристаллизации). Так, по определению Международного института холода (МИХ) и комитета FAO/WHO, процесс замораживания, согласно величине средней скорости ( $\omega_{\text{ср}}$ ), классифицируется определенным образом, данные показаны в таблице 1 (Антонов, 2002). Экспериментальные параметры замораживания исследуемых образцов представлены в таблице 2.

Таблица 1. Классификатор процесса замораживания МИХ по средней скорости ( $\omega_{\text{ср}}$ )

Характеристика процесса замораживания	Средняя скорость ( $\omega_{\text{ср}}$ ) в:	
	см/ч	м/с
медленное	до 0,5	до $1,38 \cdot 10^{-6}$
быстрое	0,5 ÷ 5	$1,38 \cdot 10^{-6} \div 13,8 \cdot 10^{-6}$
сверхбыстрое	5 ÷ 10	$13,8 \cdot 10^{-6} \div 27,6 \cdot 10^{-6}$
ультрабыстрое	10 ÷ 100	$27,6 \cdot 10^{-6} \div 276 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2. Экспериментальные параметры замораживания исследуемых образцов

Наименование образца	Толщина $\delta$ , м	Продолжительность $t$ , мин		Скорость замораживания	Характеристика процесса
		предустановленная	до $t_v = -18^\circ\text{C}$		
Тесто из пшеничной муки с добавлением ягеля	0,04	60	35,5	$\omega_{\text{ср}} = 9,95 \cdot 10^{-6}$ м/с или 3,58 см/ч	быстрое
				$\omega_{\text{л}} = 6,3 \cdot 10^{-6}$ м/с или 2,3 см/ч	быстрое
Тесто из ржано-пшеничной муки с добавлением ягеля	0,04	54	31,0	$\omega_{\text{ср}} = 9,8 \cdot 10^{-6}$ м/с или 3,53 см/ч	быстрое
				$\omega_{\text{л}} = 7,29 \cdot 10^{-6}$ м/с или 2,63 см/ч	быстрое
				$\omega_{\text{л}} = 6,45 \cdot 10^{-6}$ м/с или 2,32 см/ч	быстрое
Хлеб формовой ржано-пшеничный с ягелем 85 % степени готовности	0,07	80	59,0	$\omega_{\text{ср}} = 10,51 \cdot 10^{-6}$ м/с или 3,78 см/ч	быстрое
				$\omega_{\text{л}} = 7,99 \cdot 10^{-6}$ м/с или 2,87 см/ч	быстрое
Хлеб формовой пшеничный с ягелем 85 % степени готовности	0,1	108	90,35	$\omega_{\text{ср}} = 9,33 \cdot 10^{-6}$ м/с или 3,36 см/ч	быстрое
				$\omega_{\text{л}} = 8,14 \cdot 10^{-6}$ м/с или 2,93 см/ч	быстрое

Приведенные данные показывают, что аппарат Polair CR-5G обеспечивает условия быстрого замораживания. Значения коэффициента теплоотдачи ( $\alpha$ ) определяли с использованием уравнения Ньютона – Рихмана. Пример полученных графических зависимостей вида  $\alpha = f(\tau)$  приведен на рисунке 7.

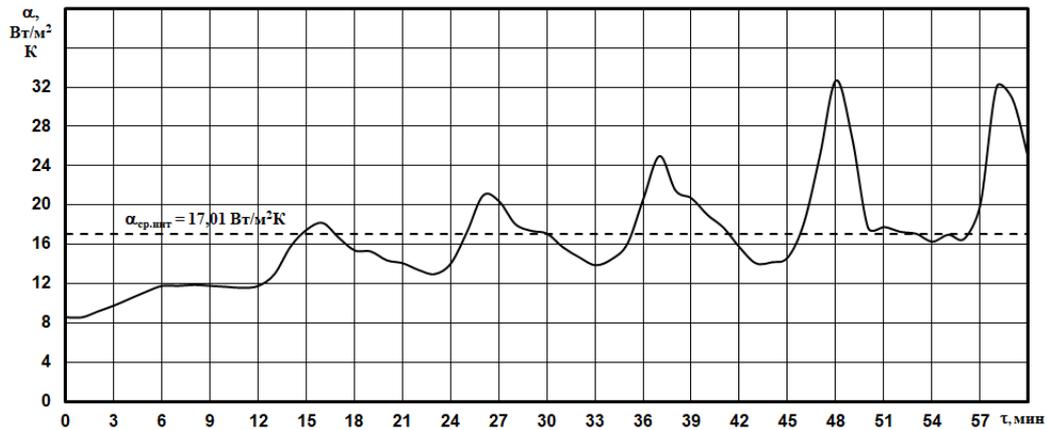


Рисунок 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha = f(\tau)$  при замораживании образцов теста из пшеничной муки с ягелем толщиной  $\delta=0,04$  м, диаметром  $d=0,09$  м при температуре воздуха  $t_b=-40$  °С и скоростью его циркуляции  $\omega_b = 1$  м/с

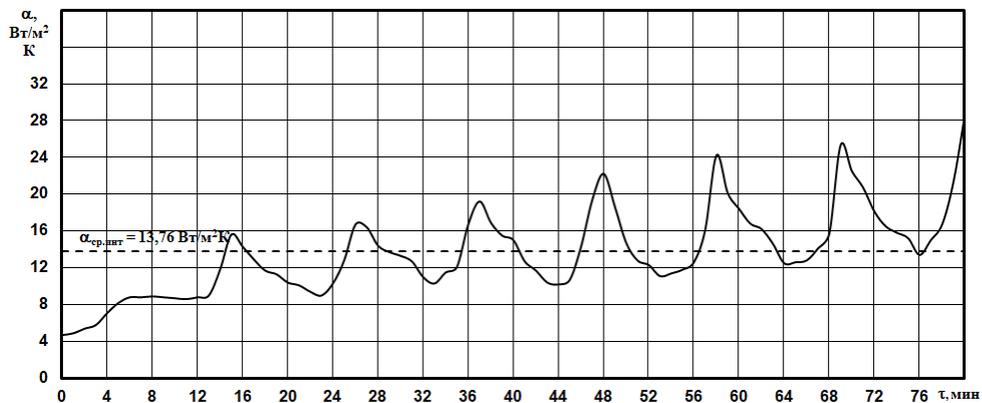


Рисунок 8. Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha = f(\tau)$  при замораживании образцов полуфабриката высокой степени готовности хлеба формового ржано-пшеничного с ягелем толщиной (высотой)  $\delta = h = 0,07$  м, длиной  $l = 0,1$  м, шириной  $b = 0,1$  м при температуре воздуха  $t_b = -40$  °С и скорости его циркуляции  $\omega_b = 1$  м/с

Для определения теплофизических характеристик исследуемых образцов использованы универсальные уравнения, разработанные А.М. Бражниковым и Э.И. Каухешвили. Уравнения позволяют аналитическим методом с достаточной точностью определить основные ТФХ продукта, опираясь на ранговые уровни его влажности ( $W$ , %) и жирности ( $F$ , %) (Антонов, 2002; Алмаши, 1981; Кульп, 2005).

Таблица 3. Основные теплофизические характеристики исследуемых образцов

Наименование образца	, %	$t_{кр}$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/кгК		Теплопроводность, Вт/мК		Удельная теплота, Дж/кг		
				$C_{охл}$	$C_{зам}$	$\lambda_{охл}$	$\lambda_{зам}$	$q_{охл}$	$q_{зам}$	$q_{дом}$
тесто из пшеничной муки с добавл	4	4	1013	2345	1554	0,426	0,695	61970	114302	21756

ением ягеля										
тесто из ржано- пшени- чной муки с добав- лением ягеля	7	5	006	219	510	,408	,638	9913	13374	9630
хлеб формо- вой ржано- пшени- чный с ягелем 85% степен и готовн ости	5	3,5	1010	2303	1540	0,42	0,676	61030	121075	22330
хлеб формо- вой пшени- чный с ягелем 85% степен и готов- ности	3,5	5	1014	2366	1562	0,429	0,705	66248	104932	20306

Для оценки достоверности полученных результатов экспериментальных исследований, основные параметры процесса ( $\alpha$ ,  $\tau$ ) определяли расчетным путем (таблица 4).

Таблица 4. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений основных параметров замораживания исследуемых образцов

Параметр	Наименование образца	Толщина $\delta$ , м	Значение		Погрешность $\Delta$ , %
			экспериментальное	расчетное	
$\alpha$ , Вт/м <sup>2</sup> К	тесто из пшеничной муки	0,04	16,42	17,63	6,9
	тесто из пшеничной муки с добавлением ягеля	0,04	17,01	17,63	3,5

	тесто из ржано-пшеничной муки с добавлением ягеля	0,04	16,11	17,63	8,6
	тесто для сдобной булочки со сливочным маслом и ягелем	0,04	16,91	17,63	4,1
	хлеб формовой ржано-пшеничный с ягелем 85% степени готовности	0,07	13,76	14,29	3,7
	хлеб формовой пшеничный с ягелем 85% степени готовности	0,1	11,94	12,51	4,6
τ, мин	тесто из пшеничной муки	0,04	30,5	32,75	6,8
	тесто из пшеничной муки с добавлением ягеля	0,04	35,5	33,64	5,2
	тесто из ржано-пшеничной муки с добавлением ягеля	0,04	31,0	33,87	8,4
	тесто для сдобной булочки со сливочным маслом и ягелем	0,04	28,5	30,12	5,4
	хлеб формовой ржано-пшеничный с ягелем 85% степени готовности	0,07	59,0	57,1	3,2
	хлеб формовой пшеничный с ягелем 85% степени готовности	0,1	90,5	94,35	4,1

Общая оценка полученных результатов сравнения показала расхождение между расчетными и экспериментальными величинами по коэффициентам теплоотдачи ( $\alpha$ ) и по продолжительности процесса ( $\tau$ ) – в среднем на уровне от 3,5 до 8,5 %, что не превышает принятых в инженерной практике допустимых значений  $\Delta \leq 10 \div 12\%$ . Это свидетельствует о достоверности полученных экспериментально параметров замораживания образцов теста и хлеба рассматриваемого ассортимента, а также подтверждает работоспособность предложенных методик расчета ( $\alpha$ ) и ( $\tau$ ) для условий организации процесса, аппаратом шокового замораживания Polair CR-5G.

Отметим, что полученный интервал коэффициентов теплоотдачи ( $\alpha$ ) на уровне 12÷18 Вт/м<sup>2</sup>К относится к условиям вынужденного конвективного теплообмена со слабой циркуляцией воздуха, характерным для камерного способа замораживания и при применении скороморозильных аппаратов периодического принципа действия (стеллажные, тележечные, люлечные) (Краус, 2004; Лабутина, 2005; Венгер, 2002; Венгер, 2001).

### Заключение

Благодаря проведенному анализу впервые получены данные о теплофизических свойствах тестовых заготовок и полуфабриката хлеба высокой степени готовности (85%) из ржано-пшеничного и пшеничного теста, обогащенного ягелем.

В процессе исследований решены следующие задачи:

- создан экспериментальный стенд на базе аппарата шокового замораживания Polair CR-5G;
- разработана методика экспериментальных исследований основных параметров процесса замораживания тестовых заготовок различной степени готовности;
- определена продолжительность замораживания ( $\tau_{\text{эксп}}$ ) опытных образцов, средняя ( $\omega_{\text{ср}}$ ) и линейная ( $\omega_{\text{л}}$ ) скорости замораживания (кристаллизации), коэффициент теплоотдачи ( $\alpha$ ) и его среднее интегральное значение ( $\alpha_{\text{ср.инт}}$ );
- разработаны рациональные режимы замораживания, на базе модельного системного расчета параметров процесса ( $\alpha$ ,  $\tau$ );
- проведена комплексная оценка полученных результатов исследований.

### Список литературы

1. Алмаши Э., Эрдели Л., Шарой Т. Быстрое замораживание пищевых продуктов: Пер. с венг. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 408 с.
2. Антонов А.А., Бобков А.В., Венгер К.П., Пчелинцев С.А. Классификация пищевых продуктов для унификации расчетов холодильного оборудования. М.: Мясная индустрия, 2002. № 5. С. 45-46.
3. Антонов А.А., Венгер К.П. Азотные системы хладоснабжения для производства быстрозамороженных пищевых продуктов: монограф. Рязань: Узорочье, 2002. 205 с.
4. Белявская И.Г., Лабутина Н.В., Балыхин М.Г., Юркина К.С., Никифорова Д.С., Матвеева И.В. Технологические аспекты криогенных технологий хлебобулочных изделий с использованием Carbo activatus // Пищевая промышленность. 2019. №3.
5. Венгер К.П., Выгодин В.А. Машинная и безмашинная системы хладоснабжения для быстрого замораживания пищевых продуктов. М.: Узорочье, 1999. 144 с.
6. Венгер К.П., Мотин В.В., Стефанова В.А., Феськов О.А. Расчет и компоновка воздушного скороморозильного аппарата со спиральным конвейером: метод. ук. М.: МГУПБ, ООО «Полисувенир», 2005. 28 с.
7. Венгер К.П., Мотин В.В., Феськов О.А. Расчет технологического оборудования: аппаратов непрерывного действия для быстрого замораживания пищевых продуктов. М.: МГУПБ, ООО «Полисувенир», 2001. 30 с.
8. Венгер К.П., Ручьев А.С., Феськов О.А. Исследование процесса быстрого замораживания пищевых продуктов в трехзонном азотном аппарате. М.: Вестник МАХ, 2001. Вып. 2. С.36-37.
9. Венгер К.П., Антонов А.А. Перспективные направления совершенствования процесса и оборудования быстрого замораживания пищевых продуктов // Холодильный бизнес. 2002. № 2. С. 40-42.
10. Голянд М.М., Малеванный Б.Н. Холодильное технологическое оборудование. М.: Пищевая промышленность, 1997. 335 с.
11. Голянд М.М., Малеванный Б.Н., Печатников М.З., Плотников В.Т.: сб. пр. расч. и лаб. работ по курсу «Холодильное технологическое оборудование». М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 168 с.
12. Краус С., Аджигитов J.I., Люнина Е. Глубокая заморозка перспективная технология в хлебопечении // Хлебопродукты. 2005. № 7. С. 38-39.
13. Лабутина Н.В. Ржано-пшеничный хлеб из замороженных полуфабрикатов // Хлебопродукты. 2004. № 12. С.30-32.
14. Лабутина Н.В. Технология производства хлебобулочных изделий из замороженных полуфабрикатов: монограф. Смоленск: Универсум, 2004. 236 с.

15. Производство изделий из замороженного теста. Под ред. К. Кульп, К. Лоренц, Ю. Брюммер. Пер. с англ. под общ. ред. И.В. Матвеевой. СПб.: Профессия, 2005. 288 с.
16. Рощина Е.В., Григорьева Р.З., Баранец С.Ю., Давыденко Н.И., Куракин М.С. Шоковая заморозка булочных изделий с использованием нетрадиционного растительного сырья на предприятиях общественного питания // Техника и технология пищевых производств. 2020. № 3.
17. Стрелюхина А.Н., Мачихин С.А. Риск-ориентированный подход при создании и совершенствовании технологических систем пищевых производств // Пищевая промышленность. 2013. № 5. С. 26-29.
18. Стрелюхина А.Н., Мачихин С.А., Васильев А.М. Системное обеспечение качества и безопасности продуктов питания на примере хлебопекарной продукции // Пищевая промышленность. 2014. № 7. С. 8-11.
19. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность. 1979. 270 с.

### **Investigation of the parameters of the freezing process of dough blanks and bakery products of various degrees of readiness**

#### **Alexey V. Iyalin**

Independent researcher  
Russian University of Biotechnology  
Moscow, Russia  
Novikova@mgupp.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

#### **Oleg A. Feskov**

Independent researcher  
Russian University of Biotechnology  
Moscow, Russia  
FeskovOA@mgupp.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

#### **Alla N. Strelyukhina**

Independent researcher  
Russian University of Biotechnology  
Moscow, Russia  
StrelyukhinaAN@mgupp.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

#### **Zhanna V. Novikova**

Independent researcher  
Russian University of Biotechnology  
Moscow, Russia  
zh.novikova@mail.ru  
ORCID 0000-0001-8652-4777

Received 04.11.2023

Accepted 22.12.2023

Published 15.02.2024

UDC 664.6  
EDN HCWRRF  
VAK 4.3.3. Food systems (technical sciences)  
OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

### Abstract

The purpose of this work was experimental studies of the parameters of the rapid freezing process of dough blanks made of wheat flour and rye-wheat mixture enriched with yagel. The article presents experimental studies of the parameters of the rapid freezing process of dough blanks made of wheat flour and rye-wheat mixture enriched with yagel. The thermophysical characteristics of dough blanks and semi-finished bread of a high degree of readiness are determined. The research was carried out on a laboratory experimental installation based on the Polair CR-5G shock freezing device. In the course of the research, the values of the temperature field, the heat flux of the frozen samples, the temperature and speed of cooling air circulation, the average speed and duration of freezing were obtained. The reliability of the obtained results was assessed. The study of thermophysical processes occurring during freezing, cryo storage and defrosting of dough and semi-finished bakery products of a high degree of readiness has theoretical and practical significance for the development of technology for the preparation of bakery products using shock freezing. The obtained research results were used to determine the rational modes of technological processes, the development of scientifically sound technological solutions for the creation of technology for the preparation of bakery products from frozen semi-finished products.

### Keywords

dough pieces, freezing, thermophysical properties, physico-chemical properties, enriched bakery products.

### References

1. Almashi E., Erdeli L., Sharoy T. Fast freezing of food products: Trans. from veng. M.: Light and food industry, 1981. 408 p
2. Antonov A.A., Bobkov A.V., Wenger K.P., Pchelintsev S.A. Classification of food products for the unification of calculations of refrigeration equipment. M.: Meat industriya, 2002. № 5. С. 45-46.
3. Antonov A.A., Wenger K.P. Nitrogen cooling systems for the production of quick-frozen food products: monograph. Ryazan: Uzoroche, 2002. 205 p.
4. Belyavskaya I.G., Labutina N.V., Balykhin M.G., Yurkina K.S., Nikiforova D.S., Matveeva I.V. Technological aspects of cryogenic technologies of bakery products using Carbo activatus // Food industry. 2019. № 3.
5. Wenger K.P., Vygodin V.A. Machine and machine-less cooling systems for fast freezing of food products. M.: Uzorechye, 1999. 144 p.
6. Wenger K.P., Motin V.V., Stefanova V.A., Feskov O.A. Calculation and layout of an air defrosting device with a spiral conveyor: method. uk. M.: MGUPB, LLC Polisuvenir, 2005. 28 p.
7. Wenger K.P., Motin V.V., Feskov O.A. Calculation of technological equipment: continuous-acting devices for fast freezing of food products. Moscow: MGUPB, Polisuvenir LLC, 2001. 30 p.
8. Wenger K.P., Ruchev A.S., Feskov O.A. Investigation of the process of rapid freezing of food products in a three-zone nitrogen apparatus. M.: Vestnik MACH, 2001. Iss. 2. С.36-37.
9. Wenger K.P., Antonov A.A. Promising directions for improving the process and equipment of rapid freezing of food products // Refrigeration business. 2002. № 2. pp. 40-42.
10. Golyand M.M., Malevanny B.N. Refrigerating technological equipment. M.: Food industry, 1997. 335 p.
11. Golyand M.M., Malevannyj B.N., Pechatnikov M.Z., Plotnikov V.T.: sat., rasch. and lab. works on the course «Refrigeration technological equipment». M.: Light and food industry, 1981. 168 p.

12. Kraus S., Akzhigitov J.I., Lunina E. Deep freezing perspective technology in bakery // Bread products. 2005. № 7. pp. 38-39.
13. Labutina N.V. Rye-wheat bread from frozen semi-finished products // Bread products. 2004. № 12. pp.30-32.
14. Labutina N.V. Technology of production of bakery products from frozen semi-finished products: monograph. Smolensk: Universum, 2004. 236 p
15. Production of frozen dough products. Edited by K. Kulp, K. Lorenz, Y. Brummer. Translated from English. under the general editorship of I.V. Matveeva. St. Petersburg: Profession, 2005. 288 p.
16. Roshchina E.V., Grigorieva R.Z., Baranets S.Yu., Davydenko N.I., Kurakin M.S. Shock freezing of bakery products using non-traditional vegetable raw materials at public catering enterprises // Technique and technology of food production. 2020. № 3.
17. Strelyukhina A.N., Machikhin S.A. Risk-oriented approach in the creation and improvement of technological systems of food production // Food industry. 2013. № 5. pp. 26-29.
18. Strelyukhina A.N., Machikhin S.A., Vasiliev A.M. Systemic quality assurance and food safety on the example of bakery products // Food industry. 2014. № 7. pp. 8-11.
19. Chizhov G.B. Thermophysical processes in food refrigeration technology. M.: Food industry. 1979. 270 p.

## Внедрение энергоэффективных технологий в животноводческом комплексе

### Юрий Васильевич Забайкин

Кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов  
Российский государственный университет нефти и газа НИУ им. И.М. Губкина  
Москва, Россия  
79264154444@yandex.com  
ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 05.11.2023

Принята 26.12.2023

Опубликована 15.03.2024

УДК 636.084.7

EDN HELWDO

BAK 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)  
OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

### Аннотация

В контексте российской аграрной сферы, перспективы прогресса в секторе животноводства обусловлены сложным взаимодействием экономических, логистических и экологических факторов. Эти элементы определяют траектории усовершенствования и укрепления позиций продукции на международных рынках. Достижение указанных целей подразумевает ориентацию на ключевые тенденции, направленные на увеличение производительности и эффективности операций в животноводческих хозяйствах. В дискурсе данной статьи акцентируется внимание на стратегиях повышения производительности в отрасли скотоводства через применение методов математического моделирования и экономические оценки критериев эффективности. Исследователи предпочли параметры, утвердившиеся в международной практике, включая критерии, связанные с оптимизацией энергопотребления предприятий, и разработали комплексную экономическую модель, основанную на необходимости улучшения функциональных характеристик предприятий. Специфически, объектом анализа выступает сфера производства молока, которая сталкивается с острой конкуренцией, эманацирующей не только от классических производителей молочных продуктов, но и от производителей альтернативных продуктов. В контексте исследования представлены данные по производственным объемам, энергетическим и массовым характеристикам продукции, а также анализируется влияние сокращения энергозатрат на эффективность молоководческих предприятий в агрегате. Исследование включает модель, демонстрирующую экономическую выгоду от снижения энергетических затрат через модернизацию, а не полную реконструкцию производственных комплексов.

### Ключевые слова

животноводство, молоководство, снижение затрат, экономия энергии, развитие.

### Введение

Переосмысление экономических аспектов и энергетической эффективности в секторе аграрного производства Российской Федерации, в частности в отрасли производства молочной продукции, является ключевым фактором для достижения устойчивого развития и повышения конкурентоспособности на национальном и международном уровнях. Процесс глобализации и интеграция рыночных механизмов способствуют увеличению доли затрат на энергоносители в общей структуре издержек производства сельскохозяйственной продукции, подчеркивая значимость оптимизации энергопотребления (Godinot, 2015). Особенно это касается отрасли молоководства, где

издержки на энергоресурсы заметно снижают потенциал конкурентоспособности молока и молочной продукции как на внутреннем, так и на внешнем рынках (Chen, 2017).

Стратегическое направление в управлении энергетическими ресурсами предполагает разработку и внедрение энергосберегающих технологий и методик, что подразумевает не только сокращение объемов потребления энергоресурсов, но и повышение общей экономической эффективности производственного процесса (Roma, 2015). Тем не менее исследования в области минимизации энергоемкости в агропромышленном комплексе, в частности в секторе производства молока, продолжают оставаться актуальными и требуют дополнительного изучения и аналитического осмысления (Derner, 2017).

Производственная эффективность в аграрном секторе, а в частности в молочном скотоводстве, напрямую зависит от обеспеченности животных качественным кормом. В России затраты на кормление животных существенно превышают показатели, зафиксированные в странах с развитым агропромышленным сектором, что обусловлено неоптимальным распределением кормовых ресурсов и их недостаточным белковым составом (Naskar, 2012; Mottet, 2017).

Актуальность применения энергосберегающих технологий в процессе производства кормов обусловлена стремлением к оптимизации производственного цикла, включая выбор высокоурожайных и малоэнергозатратных культур, развитие культурных пастбищ и внедрение передовых методик хранения кормов с целью снижения дополнительных энергетических издержек (Soren, 2012).

Согласно исследованиям Qin (2000), наиболее энергетически эффективными и сбалансированными по нутриентному составу выступают зернофуражные культуры. Так, энергоемкость производства озимой пшеницы составляет 32,3 кг условного топлива на единицу продукции и 365,1 условного топлива на единицу продукции в протеиновом эквиваленте. Аналогичные показатели для ярового ячменя – 36,4 кг и 492,9 кг, для кукурузы на зерно – 40,2 кг и 680,8 кг соответственно. Зеленая масса улучшенных пастбищ характеризуется энергоемкостью 34,6 условного топлива на единицу продукции и 245,1 кг условного топлива на единицу продукции в пересчете на протеин. Для зеленой массы однолетних и многолетних трав, сена из них, сенажа и бахчевых кормовых культур эти показатели составляют 56,3 кг и 399,2 кг, 57,1 кг и 398,4 кг, 28,5 кг и 331,7 кг, 42,6 кг и 512 кг соответственно (Lee, 2010).

Ключевыми векторами снижения энергозатратности кормопроизводства и оптимизации энергоемкости рационов для сельскохозяйственных животных являются: повышение урожайности кормовых культур; минимизация количества и энергоемкости технологических операций; имплементация энергосберегающих технологий (пунктирный посев кормовых культур пневматическими сеялками, выполнение технологических операций на стационаре с использованием электропривода, редуцирование доз энергоемких минеральных азотных удобрений за счет увеличения доз органических удобрений с низкой энергоемкостью, применение интегрированной системы фитосанитарной защиты, позволяющей в 15-20 раз снизить энергоемкость по сравнению с химическими методами); балансирование кормов по энергии, белку и аминокислотам; пастбищное использование кормовых угодий; силосование кормов путем предварительного прессования зеленой массы в полевых условиях; приготовление кормовых реагентов без термической обработки.

Перспективным направлением редуцирования энергоемкости молочного производства выступает повышение продуктивности коров посредством полноценного кормления, использования высокопродуктивных пород, улучшения их генетического потенциала (Gracz, 2018). К мероприятиям, нацеленным на повышение продуктивности коров, относятся (Vanderholm, 2016): использование кормовых рационов, сбалансированных по энергии, белку, аминокислотам; внедрение специализированных, высокопродуктивных пород крупного рогатого скота; пролонгация срока продуктивного использования коров; применение необходимых ветеринарных препаратов; неукоснительное соблюдение режима работы фермы, недопущение остановки технологических процессов по уходу за животными (доение, поение, кормление, удаление навоза).

При двукратном увеличении продуктивности коров (с 3600 кг до 7200 кг) энергоемкость производства молока редуцируется в 1,54 раза, затраты кормов в расчете на 1 ц молока – в 1,26 раза,

себестоимость – в 1,22 раза (при этом стоимость кормов (без учета стоимости энергоресурсов) снижается на 21,8%, энергоресурсов на обслуживание молочной фермы – на 19,4%, а стоимость энергоресурсов на производство кормов – на 44,5%) (Archimede, 2014).

Значительные потери энергии обусловлены несовершенством объемно-планировочных и конструктивных решений животноводческих зданий и сооружений: ограждающих конструкций, въездных и оконных проемов, отсутствием тамбуров и чердачных перекрытий, необоснованными пространственными разрывами между фермами (Sejian, 2015). Только по этой группе факторов общее энергопотребление возрастает на 10-15% (Silva, 2017).

Для минимизации теплотерь ограждающих конструкций животноводческих помещений целесообразно редуцировать их удельную площадь в расчете на одно скотоместо и повышать уровень теплозащиты (Niu, 2016). Переход от павильонной к блочной застройке позволяет снизить теплотери здания на 34-40% (Mamedov, 2017). При блочной застройке по сравнению с павильонной, площадь, занимаемая фермой на 1000 коров, уменьшается от 9,5 до 3,3 га, общий периметр всех зданий (в расчете на одну голову) – от 1,3 до 0,42 погонных метра, площадь стен – от 3,39 до 1,67 кв. м соответственно.

Одним из основополагающих векторов энергосбережения в строительстве коровников являются конструктивные мероприятия, ассоциированные с повышением термического сопротивления ограждающих конструкций (van Zanten, 2016). Отдельные специалисты позиционируют строительные материалы как новый источник энергии. Одновременно этот источник может характеризоваться невысокой стоимостью и меньшей материалоемкостью. Так, редуцирование коэффициента теплопередачи стен с 4 до 2,5 кДж/(ч/куб. м/°С) и перекрытия с 2,8 до 1,6 кДж/(ч/куб. м/°С) обеспечивает сокращение теплотерь через ограждающие конструкции в помещениях для КРС до 30%.

### **Материалы и методы исследования**

Проведен углубленный энергетический анализ фермы с беспривязным боксовым содержанием 400 голов крупного рогатого скота. В ходе исследования определены показатели энергоемкости и энергозатратности ключевых компонентов производства молока (Rukavishnikova, 2018). Для вычисления данных параметров использовались технологические операции и энергетические эквиваленты (Somwari, 1996). При калькуляции совокупных энергозатрат на производство молока были приняты следующие исходные данные:

- среднегодовое поголовье животных (гол.): дойные коровы - 406; нетели – 16; телята в возрасте до 3 месяцев – 130; молодняк от 3 до 6 месяцев – 96;
- продолжительность зимнего периода – 220 дней, летнего – 145; годовой удой на одну корову – 3550 кг молока; ежегодная выбраковка животных – 22%;
- 60% отелов приходится на первое полугодие и 42% – на второе; выход телят на 100 коров – 92; средняя живая масса коровы – 557 кг;
- средняя живая масса телят при рождении – 32 кг, при реализации в 6-месячном возрасте – 1487 кг.

Предусмотрен односменный режим работы обслуживающего персонала, за исключением операторов по уходу за животными, которые трудятся в две смены. Продолжительность рабочей недели составляет 42 часа при 5-дневной рабочей неделе. Численность обслуживающего персонала – 34 человека.

В связи с волатильностью валютного курса все экономические показатели и расчеты эффективности финансовой модели приведены в долларах США.

### **Результаты и обсуждение**

Чтобы уменьшить массу конструкций целесообразно применять комплексные или комбинированные конструкции, в которых несущую функцию выполняют конструктивные плотные бетоны, а теплоизолирующую – легкие материалы. Перспективным является применение металлических конструкций с использованием полимеров и материалов на основе отходов сельскохозяйственного и промышленного производства. Перспективным направлением в области

энергосбережения является переход на новые типы конструкций ограждения – самонесущие и навесные наружные стены: деревянные с эффективными утеплителями, металлические панели – «сэндвичи» и тому подобное.

Затраты энергии на потребленную электроэнергию:

$$E_e = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m q_e N_i t_i n_i = 4,21 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Затраты совокупной энергии при потреблении жидкого топлива, а также смазочных материалов:

$$E_{PMM} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m q_{ni} g_{ni} n_i t_i = 1,46 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Затраты совокупной энергии при потреблении тепловой энергии:

$$E_T = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n q_{mi} M_i = 3,75 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Полная энергоемкость восстановления поголовья коров на протяжении года составила 18219,08 ГДж с учетом того, что поголовье коров, способных к отелу, составляет 98 голов.

В этом случае удельные затраты энергии при восстановлении поголовья будут составлять 12,7 МДж/кг.

Суммарная энергоемкость при производстве кормов составляет:

$$E_{KB} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n q_{vki} B_i C_i = 15,82 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Суммарная энергоемкость при подготовке кормов составляет:

$$E_{KP} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n q_{kpi} B_i C_i = 18,5 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Из расчета внесения на одну корову за сутки 0,6 кг подстилки, ее годовая масса будет составлять 118 т. Таким образом суммарная энергоемкость производства подстилки будет составлять:

$$E_p = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m q_{ni} B_i L_i = 1,2 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Суммарная энергоемкость потребленной животными в течение года воды составит:

$$E_v = \frac{q_v}{W} \sum_{i=1}^m g_v n_i = 0,0146 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Суммарная энергоемкость зданий и сооружений, машин и оборудования, которые амортизированы при производстве продуктов животноводства, будет составлять:

$$E_{ovf} = E_{zm} + E_b + E_{kc} = 1,078 + 0,6 + 0,12 = 1,898 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Суммарная энергоемкость рабочей силы:

$$E_p = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m q_{pi} n_i t_i = 2,34 \text{ МДж} / \text{кг}$$

По результатам проведенных расчетов определена полная энергоемкость при производстве продуктов животноводства в МДж на единицу изготовленной продуктов (1 кг):

$$E_{pt} = E_{pe} + E_{vpsm} + E_p + E_{ovf} = 61,86 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Энергоэквивалент производства молока составляет 3,07 МДж/кг. Таким образом коэффициент энергетической эффективности составляет:

$$K_{ee} = \frac{E_{vip}}{E_{pt}} 100\% = \left( \frac{3,07}{61,86} \right) 100\% = 4,9\%$$

На основе биоэнергетической оценки установлено, что коэффициент энергоэффективности производства молока составляет около 5%, что является достаточно низким. С учетом сопутствующей оценки (телята и их прирост, выбракованные животные) и косвенной (экскременты) он может вырасти в три-четыре раза.

В структуре удельных затрат энергии при производстве молока наибольший удельный вес приходится на корма, поголовье скота и энергоносители. Удельным весом для подготовки воды, а также применение ветеринарных препаратов пренебрегаем, поскольку они являются незначительными.

Таблица 1. Структура удельных затрат энергии по видам

Виды затрат	Удельные затраты энергии	
	МДж/кг	%
Электроэнергия	4,21	6,8
Топливо и смазочные материалы	1,46	2,4
Тепловая энергия	3,75	6,0
Поголовье скота	12,7	20,5
Корма	34,3	55,4
Подстилка	1,20	2,0
Основные производственные фонды	1,90	3,1
Работа	2,34	3,8
Всего	61,86	100

Усугубление экологической проблематики в совокупности с повышением стоимости традиционных энергоресурсов обусловили значительный интерес к технологиям биоконверсии органических отходов (биомассы) с целью получения энергии. Тот факт, что животные недостаточно эффективно усваивают энергию растительных кормов и более половины этой энергии утилизируется непродуктивно, трансформируясь в навоз, позволяет рассматривать органические отходы не только как ценное сырье для производства удобрений, но и как мощный возобновляемый источник энергии.

В послевоенный период, озаменованный энергетическим кризисом, в ряде европейских стран для компенсации дефицита жидкого топлива были инициированы исследования по получению биогаза из отходов животноводства, в частности, из экскрементов сельскохозяйственных животных. Эксплуатация нескольких десятков установок, сконструированных в тот период, продемонстрировала возможность переработки животных экскрементов путем метаногенеза. Полученный биогаз после компрессии применялся преимущественно для привода тракторов. Однако в условиях конкуренции с недорогими видами традиционного топлива малопродуктивное и трудоемкое производство биогаза и его утилизация оказались экономически нецелесообразными.

В настоящее время ситуация кардинально изменилась. Острый дефицит энергии, сопровождающийся ростом цен на нефть, как перманентно действующий фактор мировой экономики, обусловил инициацию ряда научно-исследовательских программ, ориентированных на поиск и практическое использование дополнительных локальных топливных ресурсов. В этих условиях проблема переработки биомассы в энергетический биогаз вновь выдвигается на первый план.

Следует акцентировать внимание на том, что причины возобновления интереса к анаэробной ферментации выходят за рамки, ограниченные исключительно энергетическими целями. Переход животноводства на индустриальную основу и ассоциированная с этим концентрация животных на крупных фермах и комплексах приводит к резкому увеличению отходов и стоков. Практика сброса животноводческих отходов на земли, не используемые в сельскохозяйственном производстве, в

современных условиях недопустима, а навоз и его стоки становятся важными источниками загрязнения окружающей среды.

Одним из путей рационального использования навоза и стоков животноводческих ферм является их метановое сбраживание (метаногенез), который оказался эффективным способом обеззараживания жидкого навоза и сохранения его в качестве удобрения при одновременном получении локального энергоносителя – биогаза.

В естественных условиях разрушение любых видов биомассы, в том числе животного навоза, происходит в гумусе почвы путем разложения на элементарные соединения под действием разлагающих организмов, грибов, бактерий. Для данного процесса желательны влажность, тепло и отсутствие света. На конечной стадии процесса полное разложение осуществляется под действием большого количества бактерий, классифицируемых как аэробные или анаэробные. Аэробные бактерии развиваются преимущественно в присутствии кислорода, с их участием углерод биомассы окисляется до  $\text{CO}_2$ . В замкнутых объемах с недостаточным поступлением кислорода из внешней среды развиваются анаэробные бактерии, также существующие за счет разложения углеводов. В конечном итоге в результате их жизнедеятельности углерод распределяется между полностью окисленным  $\text{CO}_2$  и полностью восстановленным  $\text{CH}_4$ . Питательные вещества, такие как растворимые соединения азота, сохраняются в качестве удобрений в почвенном гумусе. Реакции разложения биомассы, осуществляемые микроорганизмами, также относятся к процессам ферментации, однако для процессов, протекающих в анаэробных условиях, зачастую предпочтителен термин «брожение» («сбраживание»).

Биогаз представляет собой смесь  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , образующуюся в специальных установках – биогазогенераторах (метантенках), конструкция и режим работы которых обеспечивают максимальное выделение метана. Энергия, получаемая при сжигании биогаза, может достигать от 60 до 90% исходной энергии, которой обладает сухой исходный материал. Однако газ получают из жидкой массы, содержащей 95% воды, поэтому на практике выход достаточно трудно определить. Другим и, возможно, весьма важным преимуществом процесса является то, что в его отходах содержится значительно меньше патогенных организмов, чем в исходном материале.

Биохимические процессы при сбраживании протекают в три стадии, каждая из которых обеспечивается специфической группой анаэробных бактерий.

1. Нерастворимые биологические материалы, подвергающиеся разрушению (например, целлюлоза, полисахариды, липиды), расщепляются до углеводов и жирных кислот. В функционирующем биогазогенераторе данный процесс осуществляется при температуре  $25^\circ\text{C}$  в течение 24 часов.

2. Кислотопродуцирующие бактерии синтезируют преимущественно уксусную и пропионовую кислоты. Эта стадия при аналогичной температуре также длится сутки.

3. Метанобразующие бактерии в течение примерно 14 суток при температуре  $25^\circ\text{C}$  полностью сбраживают исходные продукты, генерируя 70%  $\text{CH}_4$  и 30%  $\text{CO}_2$  с незначительными примесями  $\text{H}_2$  и возможно  $\text{H}_2\text{S}$ .  $\text{H}_2\text{S}$  может иметь существенное значение. Продуцентами водорода являются некоторые виды бактерий, в частности, клостридий.

Таким образом, структурный анализ поголовья домашних животных свидетельствует о доминирующей роли свиноводства в животноводстве (более 40%). Однако при рассмотрении объема выхода навоза и потенциального получения биогаза его доля редуцируется до 7,5-8%.

Следует также принять во внимание, что фактически свиной навоз при удалении из помещений содержит стоки, которые в наибольшей степени загрязняют окружающую среду и требуют, в первую очередь, применения эффективных технологий переработки, например, энергосберегающей технологии анаэробного сбраживания биомассы. Основным источником производства биогаза может служить навоз и животноводческие стоки с ферм крупного рогатого скота, составляющие более 92%, при этом доля потенциальной энергии из навоза поголовья коров достигает 45%. Поголовье свиней в совокупности с поголовьем молочного скота составляет 62%, а выход экскрементов и получение биогаза может составить 57 и 53% от общего количества соответственно.

Экономическое состояние, обеднение почв вследствие катастрофического снижения внесения необходимого количества удобрений, и особенно топливно-энергетический кризис последних лет, остро

выявили неудовлетворительное положение с практическим внедрением природоохранной энергосберегающей технологии сбраживания навоза и соответствующего комплекта оборудования BIODEV (биоэнергетических устройств).

Опыт по внедрению метаногенеза в сельскохозяйственную практику показывает, что в иерархии эффективности данного метода первое место занимает его экологический эффект, затем следует эффект от получения высококачественных удобрений, и только третье место занимает зачастую недооцененная или изолированно оцениваемая энергетическая составляющая процесса.

Вместе с тем многие хозяйственники считают, что главным назначением биогазовых установок является получение биогаза, служащего дополнительным источником локального энергоснабжения. Оценивая с этой точки зрения экономическую эффективность переработки биомассы, они не учитывают, что биогазовые установки являются альтернативным или дополнительным оборудованием для переработки навоза и его стоков, а поэтому расходы на их создание и эксплуатацию должны быть отнесены к оборудованию, необходимому для обеззараживания навоза и производства удобрений, а также систем мероприятий по защите окружающей среды. В этом случае биогазовые установки всегда будут иметь положительный экономический эффект.

Для животноводческих ферм возможно применение технических средств автономного энергоснабжения с использованием нетрадиционных источников энергии, а именно ветра, солнца, тепловой энергии нетрадиционных топлив.

Применению указанных энергоисточников на малых фермах способствует то, что:

- большинство технологических процессов на них выполняется на стационарном оборудовании;
- существует возможность составить график загрузки машин и механизмов, исключающий пиковое потребление энергии, что позволяет использовать источник энергии небольшой мощности;
- имеется возможность создать ресурсо- и энергосберегающие технологии и процессы с полным использованием побочных продуктов и отходов производства.

Для реализации технологических процессов в качестве источника энергии на животноводческих фермах можно использовать:

- солнечную энергию – для сушки кормов при активном вентилировании, предварительном подогреве воды и технологических процессов сушки помещений и продукции;
- энергию ветра – для привода электрогенераторов, источника механической энергии при подаче воды, привода кормоизмельчителей и навозоуборочных механизмов, помп и компрессоров;
- отходы растениеводства – как энергоресурс для получения тепловой энергии в технологических целях и обогрева помещений, получения газа для газогенераторных двигателей внутреннего сгорания.

При этом отходы используются в виде брикетов. Пастбища, как правило, удалены от линий электропередач. Поэтому на летних пастбищах используют автономные источники. Для подогрева воды можно применять гелиоводонагреватели, а для получения электроэнергии – гелиопреобразователи, микро-ГЭС (при наличии реки).

Гелиоводонагревательные установки для передвижных доильных станций отличаются от привычных стационарных гелиосистем, а для мобильных доильных станций – своей портативностью. С наступлением весеннего сезона их доставляют к месту монтажа на тракторах, а по завершении сезона возвращают обратно.

Транспортировка гелиоводонагревателя вместе с доильной станцией требует обеспечения его легкой сборки и адаптированности к многократным циклам монтажа и демонтажа. Кроме того, на пастбищах, как правило, отсутствуют грузоподъемные механизмы. Техническая вода даже при максимальных температурах нагрева (до +70°C) должна отвечать строгим критериям качества, исключающим наличие следов ржавчины, посторонних запахов и привкусов, которые могут оказать негативное влияние на органолептические свойства молока. Модульная конструкция гелиоводонагревателей обеспечивает универсальность и возможность формирования необходимой площади принимающей поверхности для объектов, расположенных на широте 45, 50°.

Также на животноводческих фермах применяется комплекс машин и автоматизированных механизмов, предназначенных как для приготовления, так и для раздачи кормов сельскохозяйственным животным и птице. Так, для раздачи кормов животным преимущественно используются традиционные ленточные и пластинчатые транспортеры, функционирующие на основе бесконечного (замкнутого) полотна, то для раздачи кормов птице внедряются инновационные виды механизированных средств, обеспечивающих одновременное смешивание, транспортировку и раздачу кормовых смесей в замкнутых трубчатых магистралях, что способствует повышению эффективности реализации данных технологических процессов.

Трубчатые скребковые (шайбовые) конвейеры осуществляют транспортировку сыпучих материалов по сложным трассам, включающим вертикальные, криволинейные и горизонтальные участки. Системы транспортировки сыпучих кормов позволяют подавать их по стационарным трассам сложной конфигурации. Как правило, системы включают основной привод, приемный модуль, транспортные трубы, в которых на цепях или тросах закреплены шайбы, и выходы из кормодозатора.

В процессе транспортировки к основной массе корма, после прохождения ею первого вертикального участка, дозированно добавляются биодобавки, которые в ходе перемещения смешиваются с основной массой корма перед выгрузкой для кормления животных. Данный процесс может эффективно осуществляться при незначительных дозах добавок, однако для смешивания и одновременного транспортирования кормовых смесей необходима разработка специальных рабочих органов, обеспечивающих одновременное выполнение данного технологического процесса. Однако, вышеприведенный рабочий орган характеризуется громоздкостью и обеспечивает лишь транспортировку кормового материала.

С целью обеспечения одновременного смешивания и транспортировки с последующей раздачей кормов при общем снижении материалоемкости и энергозатрат на реализацию технологического процесса разработаны инновационные типы соответствующих рабочих органов транспортеров-смесителей, включающих направляющий кожух трубчатой формы, в котором расположены шарнирно соединенные скребковые секции с рабочей поверхностью в виде шайб. Каждая секция изготовлена из прутка и содержит кольцо и крюки. Кольцевая часть секций охвачена полиамидным диском, Г-образная цилиндрическая форма которого переходит в конусную с центральным внутренним отверстием. Рабочий орган формируется путем зацепления свободного крюка одной секции с лишним крюком соседней секции, образуя тем самым цепное соединение шарнирных секций.

Скребок-транспортер-смеситель приводится в движение приводным зубчатым колесом (на схеме не показано), контактирующим с конической поверхностью диска. При перемещении рабочего органа в кожухе компоненты сыпучих кормов увлекаются дисками и частично пересыпаются через центральные отверстия дисков, смешиваясь в однородную смесь, которая транспортируется в зону выгрузки.

Экономический эффект от применения подобного транспортера в сравнении с базовым образцом отечественного производства, спроектированным с учетом последних тенденций в области энергоэффективных технологий, заключается в снижении металлоемкости рабочего органа, а также в уменьшении энергозатрат на процесс транспортировки. Кроме того, в процессе транспортировки осуществляется смешивание компонентов смеси сыпучих грузов.

Себестоимость изготовления рабоче-тягового транспортера определяется

$$C_0 = C_m + C_{sh} + C_r$$

где  $C_m$  – стоимость материалов в себестоимости транспортера, долл;  $C_{sh}$  – стоимость шайбовых скребков;  $C_r$  – стоимость изготовления и сборки рабочего органа, долл.

Стоимость материалов в себестоимости определяется

$$C_m = mLq$$

где  $m$  – масса погонного метра рабочего транспортера;  $L$  – общая длина исходя из геометрических размеров трассы ( $L = 12\text{м}$ );  $q$  – средняя стоимость 1 кг чистой массы материала ( $q = 18$  долл/кг).

Исходя из геометрических размеров разработанных блоков, после их взвешивания получили:  
нового  $m_n = 30$  г;  
базового  $m_b = 47$  г.

При шаг скребков = 100 мм, один погонный метр тягового органа будет составлять:

$$m_{on} = m_n \cdot 10 = 300 \text{ г} = 0,3 \text{ кг}$$

$$m_{ob} = m_b \cdot 10 = 470 \text{ г} = 0,47 \text{ кг}$$

Тогда общая стоимость материала, из которого изготовили рабоче-тяговый орган будет составлять:

$$\text{нового: } C_{mn} = m_{on} Lq = 64,8 \text{ долл.}$$

$$\text{базового: } C_{mb} = m_{ob} Lq = 101,52 \text{ долл.}$$

В новом образце используются разработанные шайбовые скребки, причем их себестоимость зависит от типа производства. При изготовлении их в серийном производстве стоимость одного скребка при минимальной партии 1000 шт составляет 1,6 долл. Для транспортера-смесителя при длине трассы 12 м себестоимость новых шайбовых скребков будет составлять:

$$C_{shn} = C_{sh0} \frac{L}{t} = 0,16 \frac{12}{0,1} = 19,2 \text{ долл.}$$

Учитывая, что масса одного погонного метра базового рабочего органа в  $0,47 / 0,3 = 1,57$  является большей чем нового, то себестоимость базовых шайбовых скребков будет составлять  $C_{shb} = 19,2 * 1,57 = 30,1$  долл.

Технологическая операция изготовления и сбора рабоче-тягового органа составляет

$$C_r = mLk$$

где  $k$  – коэффициент стоимости технологической операции в отношении стоимости материала,  $k_n = 5$ ,  $k_b = 5,5$ :

$$C_{rn} = m_{on} Lk_n = 18$$

$$C_{rb} = m_{ob} Lk_b = 31$$

Тогда себестоимость изготовления рабочего органа транспортера-смесителя длиной составит:

$$\text{нового образца: } C_{0n} = C_{mn} + C_{shn} + C_{rn} = 64,8 + 19,2 + 18 = 102$$

$$\text{базового образца: } C_{0b} = C_{mb} + C_{shb} + C_{rb} = 101,5 + 30,1 + 31 = 162,6$$

Нормативная прибыль определяется

$$P = C_0 \frac{P_0}{100}$$

где  $C_0$  – себестоимость рабоче-тягового органа, долл;  $P_0 = 14...16\%$  – нормативная рентабельность, принимаем  $P_0 = 15\%$ .

Тогда для нового образца:

$$P_n = 102 \frac{15}{100} = 15,3$$

Для базового образца:

$$P_v = 162,6 \frac{15}{100} = 24,39$$

Цена рабочего органа транспортера-смесителя

$$Ch_r = C_0 + P$$

Для нового образца:

$$Ch_{rn} = C_{0n} + P_n = 102 + 15,3 = 117,3$$

Для базового образца:

$$Ch_{rb} = C_{0b} + P_b = 162,6 + 24,4 = 187$$

Балансовая цена рабоче-тягового органа транспортера-смесителя составляет

$$Ch_b = 1,2Ch_r$$

Для нового образца:

$$Ch_{bn} = 1,2Ch_{rn} = 140,8$$

Для базового образца:

$$Ch_{bb} = 1,2Ch_{rb} = 224,4$$

Экономическая эффективность от снижения материалоемкости составляет

$$E_1 = Ch_{bb} - Ch_{bn} = 83,6$$

Как было установлено, значение усилия на процесс транспортировки для разработанного рабоче-тягового органа со скребками меньше по сравнению с базовым примерно на 7% при транспортировке скорости  $v = 0,3$  м/с,  $Ft_n = 0,4$  кп, а  $Ft_b = 0,435$  кт. Тогда разница мощности за один час составит

$$N_0 = N_1 - N_2 = Ft_b v - Ft_n v = 0,01$$

Экономия электроэнергии будет в значительной степени зависеть от объемов производства, поэтому условно рассчитаем экономическую эффективность на перемещение  $V = 1000$  т кормо смеси.

При производительности транспортера-смесителя 1,6...2 т/ч, тогда расход электроэнергии составят:

$$W = N_0 \frac{V}{P} = 6,25$$

где  $V$  – масса кормо смеси, т;  $P$  – производительность транспортера-смесителя, т/ч.

При цене на электроэнергию за 1 кВт/ч – 1,14 долл, экономический эффект составит

$$E_2 = WC = 7,13$$

где  $W$  – расход электроэнергии, кВт;  $C$  – себестоимость электроэнергии, долл.

Так как базовый транспортер не осуществляет процесс смешивания, то необходимо выполнить дополнительную операцию на другом оборудовании. Согласно тарифов комбикормового предприятия, себестоимость смешивания 1 т кормовой смеси составляет порядка 2,642 долл. за 1 т. При массе продукции 1000т, затраты будут составлять:

$$C_z = mC_1 = 2642$$

Новый транспортер-смеситель данную операцию осуществляет в течение времени транспортировки, тогда:

$$E_z = C_{zb} - C_{zn} = 2642$$

Общая экономическая эффективность от использования нового транспортера-смесителя при перемещении 1000т сухих грузов, от уменьшения металлоемкости, энергозатрат и затрат смешивания составляет:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 2732,7$$

Рассчитанный экономический эффект не учитывает улучшение процесса транспортировки за уменьшения ремонтных работ и улучшения эксплуатационных показателей, что значительно увеличит его абсолютное значение.

### Заключение

Таким образом, существенную роль в энергосбережении играют организационно-экономические мероприятия, к которым относятся:

- имплементация энергетического менеджмента, энергетического аудита, нормирования энергопотребления;
- повышение квалификации персонала;
- усиление материальной заинтересованности работников в энергосбережении.

В современных условиях все большую значимость приобретает необходимость наличия на фермах кадров с соответствующими знаниями, квалификацией и опытом. Необходимость обеспечения слаженного и четкого функционирования всех участков единого технологического процесса, высокая техническая оснащенность промышленных комплексов требуют высокого уровня квалификации всех работников. С повышением уровня механизации работ на фермах труд животноводов все в большей степени становится ассоциированным с функционированием механизмов и требует специального обучения и подготовки.

Кроме того, важным представляется, что аграрные предприятия, специализирующиеся на производстве молока, исходя из необходимости обеспечения своего существования в условиях энергетического кризиса, должны в частности:

- исследовать рынки энергетических ресурсов, обеспечивать информационную безопасность путем создания собственных банков информации, позволяющих принимать обоснованные решения относительно деятельности молочной фермы в условиях нестабильности потоков энергоресурсов, негативной динамики цен на них;
- реализовывать эффективный финансовый менеджмент с целью обеспечения высокой экономической и энергетической эффективности производства молока;
- осуществлять эффективный инновационный менеджмент энергосбережения путем создания специальной подсистемы управления энергосберегающими инновациями.

Таким образом, обобщив все вышесказанное, можно сделать вывод, что энергосбережение в молочном животноводстве представляет собой масштабную комплексную задачу, реализация которой возможна по основным направлениям: таким как совершенствование и внедрение энергосберегающих технологий, повышение продуктивности животных, использование энергосберегающих зданий и сооружений, имплементация организационно-экономических мероприятий по энергосбережению в молочном скотоводстве.

### **Список литературы**

1. Agapi S, Nehring R. A graph efficiency multiproduct model of corn/livestock farming: accounting for nitrate pollution // *Annals of Operations Research*. 1996. № 68(3). pp. 379-408.
2. Archimède H. Agroecological Resources for Sustainable Livestock Farming in the Humid Tropics. Ed. H. Ozier-Lafontaine and M. Lesueur-Jannoyer // *Sustainable Agriculture Reviews: Agroecology and Global Change*. Cham: Springer International Publishing, 2014. № 14. pp. 299-330.
3. Chen X., Wilfart A., Puillet L., Aubin J. A new method of biophysical allocation in LCA of livestock co-products: Modeling metabolic energy requirements of body-tissue growth // *The International journal of life cycle assessment*. 2017. № 22(6). pp. 883-95.
4. Derner J.D. Livestock production systems in rangeland systems. Ed. David D Briske // *Processes, Management and Challenges*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 347-72.
5. Godinot O. Relative nitrogen efficiency, a new indicator to assess crop livestock farming systems // *Agronomy for Sustainable Development*. 2015. № 35(2). pp. 857-68.
6. Gracz W., Golimowski W., Butlewski K., Marcinkowski D. Analysis of the potential of methane emission and energy power from excrement of livestock in Poland. Ed. K. Mudryk, S. Werle // *Renewable energy sources: Engineering, Technology, Innovation*. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 139-49.
7. Lee H., Jeonghwan H., Hyun Y. A Study of the Energy Efficient MAC Protocol Apply to Ubiquitous Livestock Farming. Ed. T. Kim, Y. Lee, B. Kang, D. Šikezak // *Future Generation Information Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. pp. 699-707.
8. Mamedov G.B, Mamedov E.S. Method for estimating and analyzing an increase of efficiency of the ventilation system in a livestock house // *Russian Agricultural Sciences*. 2017. № 43(6). pp. 516-18.

9. Maurya V.P. 2012. Walking stress influence on livestock production. Ed. V. Sejian // *Environmental Stress and Amelioration in Livestock Production*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. pp. 75–95.
10. Mottet A. Climate change mitigation and productivity gains in livestock supply chains: Insights from regional case studies // *Regional environmental change*. 2017. № 17(1). pp. 129-41.
11. Nira S.M. Nutritional manipulations to optimize productivity during environmental stresses in livestock. Ed. V. Sejian // *Environmental Stress and Amelioration in Livestock Production*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2012. pp. 181-218.
12. Niu, Qigui, and Yu-You Li. 2016. Recycling of Livestock Manure into Bioenergy. Ed. O.P. Karthikeyan, K. Heimann, S.S. Muthu // *Recycling of Solid Waste for Biofuels and Bio-Chemicals*. Singapore: Springer Singapore, 2016. pp. 165-86.
13. Qin Fu, and Weiming Tian. 2000. Feeding the livestock: Technological Choice, Trade Policy and Efficiency. Ed. Y. Yang, W. Tian // *China's agriculture at the crossroads*. London: Palgrave Macmillan, 2000. pp. 98-117.
14. Rocco R. Life cycle assessment in the livestock and derived edible products sector. Ed. B. Notarnicola // *Life cycle assessment in the agri-food sector. Case studies, methodological issues and best practices*. Cham: Springer International Publishing, 2015. pp. 251-332.
15. Rukavishnikova I., Rumyantseva A. A methodical approach to assess the efficiency of renewable energy projects with regard to environmental component. Ed. S. Syngellakis, C. Brebbia // *Challenges and solutions in the russian energy sector*. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 193-200.
16. Sejian V. Introduction to concepts of climate change impact on livestock and its adaptation and mitigation Ed. V. Sejian, J. Gaughan, L. Baumgard, C. Prasad. // *Climate change impact on livestock: adaptation and mitigation*. New Delhi: Springer India. 2015. pp. 1-23.
17. Silva S., Rodrigues A., Ferraz A., Alonso J. An integrated approach for efficient energy recovery production from livestock and agro-industrial wastes eds. L. Singh, V.Ch. Kalia // *Waste biomass management – a holistic approach*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 339-66.
18. Soumen N. Genetic. Adaptability of livestock to environmental stresses. Ed. V. Sejian // *Environmental Stress and Amelioration in Livestock Production*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. pp. 317-78.
19. Vanderholm D.H. Management of livestock wastes for water resource protection. Ed. L.K. Wang, M.-H. S. Wang, Y.-T. Hung, N.K. Shammass // *Natural Resources and Control Processes*. Cham: Springer International Publishing, 2016. pp. 1-71.
20. Zanten V., Hannah H. E. Global food supply: Land use efficiency of livestock systems // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2016. № 21(5). pp. 747-58.

### **The introduction of energy-efficient technologies in the livestock sector**

**Yuri V. Zabaykin**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes

Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Moscow, Russia

79264154444@yandex.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 05.11.2023

Accepted 26.12.2023

Published 15.03.2024

UDC 636.084.7

EDN HELWDO

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

### **Abstract**

In the context of the Russian agricultural sector, the prospects for progress in the livestock sector are determined by a complex interaction of economic, logistical and environmental factors. These elements determine the trajectories of improving and strengthening the position of products in international markets. Achieving these goals implies focusing on key trends aimed at increasing productivity and efficiency of operations in livestock farms. The discourse of this article focuses on strategies to increase productivity in the livestock industry through the use of mathematical modeling methods and economic evaluation of performance criteria. The researchers preferred the parameters established in international practice, including criteria related to the optimization of energy consumption of enterprises, and developed a comprehensive economic model based on the need to improve the functional characteristics of enterprises. Specifically, the object of the analysis is the field of milk production, which is facing intense competition emanating not only from classic dairy producers, but also from producers of alternative products. In the context of the study, data on production volumes, energy and mass characteristics of products are presented, as well as the impact of reducing energy consumption on the efficiency of dairy enterprises in the unit is analyzed. The study includes a model demonstrating the economic benefits of reducing energy costs through modernization rather than complete reconstruction of production complexes.

### **Keywords**

animal husbandry, dairy farming, cost reduction, energy saving, development.

### **References**

1. Agapi S., Nehring R. Graphical model of multi-product corn production/animal husbandry: accounting for nitrate pollution // *Annals of Operations Research*. 1996. No. 68(3). pp. 379-408.
2. Archimedes H. Agroecological resources for sustainable livestock production in the humid tropics. Edited by H. Ozier-Lafontaine and M. Lesueur-Jeannoter // *Reviews of sustainable agriculture: agroecology and global changes*. - Moscow: Springer International Publishing, 2014. - No. 14. - pp. 299-330.
3. Chen H., Wilfart A., Puye L., Aubin J. A new method of biophysical distribution in the LCA of animal by-products: modeling the metabolic energy needs of body tissue growth // *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017. No. 22(6). pp. 883-95.
4. Derner J.D. Animal husbandry systems in pasture land systems. Ed. David D. Briske // *Processes, management and challenges*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 347-72.
5. Godinot O. The relative efficiency of nitrogen use is a new indicator for evaluating crop and livestock production systems // *Agronomy for Sustainable Development*. 2015. No. 35(2). pp. 857-68.
6. Grach V., Golimovsky V., Butlevsky K., Marcinkowski D. Analysis of the potential of methane emissions and energy production from livestock excrement in Poland. Edited by K. Mudrik, S. Werle // *Renewable energy sources: engineering, technologies, innovations*. Cham: Springer International Publishing House, 2018. pp. 139-49.
7. Lee H., Jonghwan H., Hyun Yu. A study of the application of the energy-efficient MAC protocol to widespread livestock breeding. Edited by T. Kim, Y. Lee, B. Kang, D. Shlkezak // *Information technologies of the future generation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. pp. 699-707.
8. Mammadov G.B., Mammadov E.S. Method of evaluation and analysis of improving the efficiency of the ventilation system of livestock premises // *Russian agricultural sciences*. 2017. No. 43(6). pp. 516-18.

9. Maurya V.P., 2012. The effect of stress during walking on animal husbandry. Ed. V. Sejian // Environmental stress and improvement of animal husbandry conditions. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. pp. 75-95.
10. Mottet A. Climate change mitigation and productivity improvement in livestock supply chains: conclusions from regional case studies // Regional environmental changes. 2017. No. 17(1). pp. 129-41.
11. Nira S.M. Manipulations with nutrition to optimize productivity under environmental stress in animal husbandry. Ed. V. Sejian // Environmental stress and improvement of animal husbandry conditions. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. pp. 181-218.
12. Niu, Qigui and Yu-Yu Li. 2016. Processing of livestock manure into bioenergy. Edited by O.P. Kartikeyan, K. Heymann, S.S. Mutu // Recycling of solid waste for the production of biofuels and biochemicals. Singapore: Springer Singapore, 2016. pp. 165-86.
13. Qin Fu and Weiming Tian. 2000. Livestock feeding: technological choice, trade policy and efficiency. Edited by Yu. Yang, W. Tian // China's agriculture is at a crossroads. London: Palgrave Macmillan, 2000. pp. 98-117.
14. Rocco R. Life cycle assessment in the livestock and food derivatives sector. Edited by B. Notarnicola // Life cycle assessment in the agri-food sector. Case studies, methodological issues and best practices. Cham: Springer International Publishing, 2015. pp. 251-332.
15. Rukavishnikova I., Rumyantseva A. Methodological approach to evaluating the effectiveness of projects in the field of renewable energy, taking into account the environmental component / ed. by S. Singellakis, K. Brebbia // Challenges and solutions in the Russian energy sector. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 193-200.
16. Sejian V. Introduction to the concepts of the impact of climate change on animal husbandry, adaptation to it and mitigation of its consequences, edited by V. Sejian, J. Gogan, L. Baumgard, K. Prasad. // The impact of climate change on animal husbandry: adaptation and mitigation. New Delhi: Springer India, 2015. pp. 1-23.
17. Silva S., Rodriguez A., Ferraz A., Alonso J. An integrated approach to efficient energy production using waste from animal husbandry and agro-industrial complex, edited by L. Singh, V.Ch . Potassium // Biomass waste management – a holistic approach. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 339-66.
18. Soumen N. Genetics. Adaptability of livestock to environmental stresses. Ed. V. Sejian // Environmental stress and improvement of the quality of livestock products. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. pp. 317-78.
19. Vanderholm D.H. Livestock waste management for the protection of water resources. Edited by L.K. Wang, M.-H. S. Wang, Yu.-T. Hung, N.K. Shammass // Natural resources and control processes. Cham: Springer International Publishing, 2016. pp. 1-71.
20. Zanten V., Hanna H. E. Global food supply: land use efficiency in livestock systems // International Journal of Life Cycle Assessment. 2016. No. 21(5). pp. 747-58.

## Органолептическая оценка овсяной каши быстрого приготовления

### **Светлана Николаевна Коломиец**

Кандидат сельскохозяйственных наук  
Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова  
Москва, Россия  
s.kolomiets@fncps.ru  
ORCID 0000-0002-3130-2285

### **Наталья Сергеевна Жильцова**

Независимый исследователь  
Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова  
Москва, Россия  
n.zhiltsova@fncps.ru  
ORCID 0000-0002-3436-6049

### **Ольга Ивановна Бундина**

Кандидат экономических наук  
Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова  
Москва, Россия  
o.bundina@fncps.ru  
ORCID 0000-0002-7821-6042

Поступила в редакцию 02.11.2023

Принята 21.12.2023

Опубликована 15.03.2024

УДК 664.6.037

EDN HPKGAR

БАК 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

### **Аннотация**

В последние годы на потребительском рынке наблюдается положительная динамика продаж круп быстрого приготовления и концентратов на их основе, в том числе и инстантных (не требующих варки), что свидетельствует об их востребованности. Производитель, основываясь на вкусовых предпочтениях потребителя, в структуру продукта вносит новые ингредиенты – фрукты, смеси ягод, трав, тем самым, расширяет их ассортимент. Экспертной комиссией ВНИИЗ – филиале ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН проведена оценка качества 6 образцов овсяной каши с различными добавками от разных отечественных производителей для разных торговых сетей. Для исследований были отобраны образцы овсяной каши в пакетиках, выработанные в соответствии со стандартами организации (СТО) и ТУ. Образцы каш расфасованы в индивидуальные пакетики, на которых нанесена информация, содержащая все необходимые сведения для потребителя. Экспертиза качества образцов овсяной каши проведена по органолептическим показателям с обоснованием и характеристикой каждой оценки. Оценки выставляли по пятибалльной шкале, которые потом суммировали и определяли их усредненные значения за внешний вид, цвет, запах, консистенцию и вкус балльным методом. Произведен расчет комплексной органолептической оценки (КОО) исследуемой продукции. Целью данной работы являлось проведение органолептической оценки овсяных каш быстрого приготовления и установление соответствия качества исследуемых образцов требованиям принятых нормативных документов. Для исключения предпочтения членов комиссии к тому

или иному производителю и торговой марке, каждому образцу были присвоены номера. По результатам дегустации установлено, что исследуемая овсяная каша по всем показателям соответствовала требованиям нормативных документов. Один образец (№1) из шести был непригоден для употребления (КОО менее 60). Два образца (№2 и №3) имели хорошее качество (КОО свыше 60) и отличное (КОО свыше 80) качество у трех образцов (№4-6). При этом у пробы № 6 был наивысший уровень качества (100 баллов).

### **Ключевые слова**

каша овсяная, быстрое приготовление, органолептика, балльная оценка, комплексная органолептическая оценка.

### **Введение**

Зерновые продукты – основа питания человека. Темп жизни за последние десятилетия существенно вырос. Время на приготовление еды дома остается меньше. Для традиционных круп время приготовления составляет от 30 минут и более часа (крупы из зернобобовых), поэтому каши быстрого приготовления, несомненно, актуальны в настоящее время.

Овсяная каша (овсянка) является популярным цельнозерновым продуктом, который ценят за высокое содержание питательных веществ. В ее состав входят витамины: В1 (тиамин) – около 20% от рекомендуемой суточной нормы на 100 г, витамин В5 (пантотеновая кислота) – примерно 10%, а также витамин Е – около 5%; минералы: фосфор, кальций, магний, железо, цинк, марганец и сера. Овес используют как в виде цельных злаков, так и в виде овсяных хлопьев или муки (Калорийность овсянки (крупа овсяная в сухом виде), 2024).

Овес значительно отличается от других культур своим белковым и аминокислотным составом. Преобладающая фракция белков у зерна овса – глютелины, проламины и глобулины. Аминокислотный состав овса отличается повышенным содержанием аргинина и лизина, который является незаменимой аминокислотой. Поступление в организм лизина очень важно для организма. Благодаря лизину происходит восстановление тканей и формирование коллагена (Р.А. Браун, Ю.Ю. Миллер, Ю.В. Гребенникова, 2015).

### **Материалы и методы исследования**

На первом этапе исследования проводился анализ маркировки продукции на соответствие требованиям ТР ТС 022/2011 «Пищевая продукция в части ее маркировки» (ТР ТС 021/2011 – Технический регламент Таможенного союза, 2011), и в соответствии с № 29-ФЗ от 02.01.2000 г. (ред. от 13.07.2020) «О качестве и безопасности пищевых продуктов» (Федеральный закон №29-ФЗ от 02.01.2000 г., 2020)

На втором этапе была проведена сенсорная оценка показателей качества каши по разработанной ВНИИЗ балльной шкале (табл. 1) (Е.П. Мелешкина и др., 2017, 2023). Каши готовили согласно рекомендациям по приготовлению, указанным на упаковках.

### **Результаты и обсуждение**

Органолептическая оценка, включающая в себя оценку цвета, запаха, вкуса и консистенцию каши, представлена в таблице 1. Результаты проведения сенсорной оценки овсяной каши с учетом коэффициентов весомости приведены в таблице 2 и диаграмме 1.

Таблица 1. Характеристики органолептических показателей качества овсяной каши

Образцы каши	Цвет	Соответствие Методике	Запах	Соответствие Методике	Вкус	Соответствие Методике	Консистенция каши	Соответствие Методике	
Образец 1 Каша традиционная со сливками	Свойственный для данного вида крупы/каши, кремовый с коричневым оттенком, но неоднородный	Соответствует	Не выражен (отсутствует)	Соответствует	Не выражен (отсутствует)	Соответствует	Несвойственная, неоднородная, вязкая или водянистая	Не соответствует	
Образец 2 Каша овсяная с клубникой		Соответствует		Соответствует		Соответствует			Соответствует
Образец 3 Каша овсяная с абрикосом		Соответствует	Свойственный для данного вида крупы/каши, но выраженный слабо	Соответствует		Соответствует	Соответствует	Соответствует	
Образец 4 Моментальная овсяная каша с одуванчиком и медом		Соответствует	Свойственный для данного вида крупы/каши, ярко выражен	Соответствует		Свойственный для данного вида крупы/каши, ярко выражен	Соответствует	Свойственная, Однородная, малорасыпчатая	Соответствует
Образец 5 Моментальная овсяная каша с ананасом и семенами чиа		Соответствует					Соответствует		
Образец 6 Каша овсяная клубника со сливками		Соответствует					Соответствует	Соответствует	Соответствует

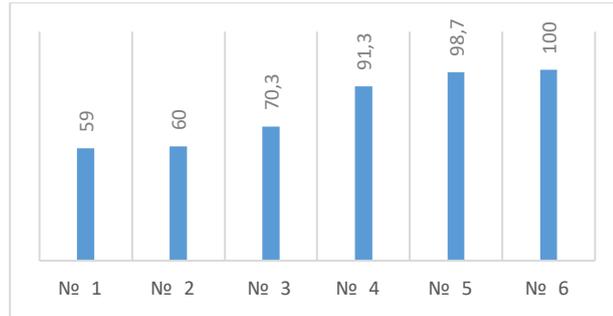


Рисунок 1. Комплексная органолептическая оценка каш

Таблица 2. Результаты сенсорной оценки качества каши по пятибалльной шкале

Шифр пробы	Показатели качества					Средняя согласованность экспертных оценок
	Цвет	Запах	Вкус	Консистенция	КОО	
№ 1	3,2	3,3	3,0	2,2	59,0	88,2
№ 2	3,2	3,2	3,0	2,7	60,0	88,7
№ 3	4,0	3,8	3,3	3,2	70,3	90,2
№ 4	5,0	4,7	4,7	4,0	91,3	94,5
№ 5	5,0	5,0	4,8	5,0	98,7	97,9
№ 6	5,0	5,0	5,0	5,0	100,0	100,0

### Заключение

Таким образом, анализ исследуемых образцов овсяной каши от разных производителей показал, что все исследуемые образцы соответствовали маркировке упаковки. Вся информация на упаковке товара отвечала требованиям нормативного документа с представлением информации о наименовании продукта, основных его характеристиках, месте нахождения предприятия, стандарте изготовления продукта, составе, сроках годности, дате выработки, условиях хранения, а также пищевой и энергетической ценности. Органолептические показатели всех образцов каш отвечали требованиям НД за исключением одной пробы.

Продукция под номером 1 была непригодна к употреблению, продукция под номерами 2 и 3 – имела хорошее качество (КОО свыше 60) и отличное (КОО свыше 80) качество у номеров 4-6. При этом у пробы № 6 был наивысший уровень качества (100 баллов).

### Список литературы

1. Калорийность овсянки (крупа овсяная в сухом виде): пищевая ценность и химический состав. 2024.
2. Браун Р.А., Миллер Ю.Ю., Гребенникова Ю.В. Использование овса в зерновых напитках брожения // Сб. тр. конф. «Пищевые инновации и биотехнологии». Кемерово, 2015. С.36-38.
3. ТР ТС 021/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции», утвержденный Решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011. № 880.
4. Федеральный закон № 29-ФЗ от 02.01.2000 г. «О качестве и безопасности пищевых продуктов».
5. Мелешкина Е.П., Приезжева Л.Г., Леонова Т.А., Панкратьева И.А., Очеретенко Т.И. Комплексная балльная органолептическая оценка зернопродуктов // Контроль качества продукции. 2017. № 5. С.40-43.
6. Мелешкина Е.П., Ванина Л.В., Жильцова Н.С., Коломиец С.Н. Комплексная балльная органолептическая оценка овсяной каши // Пищевая промышленность. 2023. № 3. С.76-78.

## Organoleptic evaluation of instant oatmeal

### **Svetlana N. Kolomiets**

Candidate of Agricultural Sciences  
V.M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems  
Moscow, Russia  
s.kolomiets@fncps.ru  
ORCID 0000-0002-3130-2285

### **Natalia S. Zhiltsova**

Independent researcher  
V.M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems  
Moscow, Russia  
N.zhiltsova@fncps.ru  
ORCID 0000-0002-3436-6049

### **Olga I. Bundina**

Candidate of Economic Sciences  
V.M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems  
Moscow, Russia  
o.bundina@fncps.ru  
ORCID 0000-0002-7821-6042

Received 02.11.2023  
Accepted 21.12.2023  
Published 15.03.2024

UDC 664.6.037  
EDN HPKGAR  
VAK 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences)  
OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

### **Abstract**

In recent years, the consumer market has seen a positive trend in sales of instant cereals and concentrates based on them, including instant (not requiring cooking), which indicates their demand. The manufacturer, based on the taste preferences of the consumer, introduces new ingredients into the product structure – fruits, mixtures of berries, herbs, thereby expanding their range. By the Expert Commission of the VNIIZ – branch of the Federal State Budgetary Institution «Federal Scientific Center for Food Systems named after V. M. Gorbatov» RAS conducted a quality assessment of 6 samples of oatmeal porridge with various additives from different domestic manufacturers for different retail chains. For research, samples of oatmeal porridge in bags were selected, developed in accordance with the standards of the organization (SRT) and technical specifications. The cereal samples are packaged in individual bags, which contain information containing all the necessary information for the consumer. The examination of the quality of oatmeal samples was carried out according to organoleptic indicators with justification and characteristics of each assessment. The scores were given on a five-point scale, which were then summed up and their average values for appearance, color, smell, consistency and taste were determined using the point method. The calculation of the complex organoleptic evaluation (COC) of the studied products was carried out. The purpose of this work was to carry out an organoleptic assessment of instant oatmeal porridges and to establish the compliance of the quality of the studied samples with the requirements of accepted regulatory documents. To exclude the preference of the commission members for a particular manufacturer and trademark, each sample was assigned

numbers. According to the results of the tasting, it was found that the studied oatmeal porridge met the requirements of regulatory documents in all respects. One sample (№ 1) out of 6 was unsuitable for consumption (COO less than 60). Two samples (№ 2 and No. 3) had good quality (COO over 60) and excellent (COO over 80) quality in three samples (№ 4-6). At the same time, sample № 6 had the highest quality level (100 points).

#### **Keywords**

oatmeal porridge, fast cooking, organoleptics, score, comprehensive organoleptic assessment.

#### **References**

1. Caloric content of oatmeal (dry oatmeal): nutritional value and chemical composition. 2024.
2. Brown R.A., Miller Yu.Yu., Grebennikova Yu.V. The use of oats in grain fermentation beverages // Sb. tr. conf. «Food innovations and biotechnologies». Kemerovo, 2015. pp.36-38.
3. TR CU 021/2011 Technical Regulations of the Customs Union «On food safety», approved by the Decision of the Commission of the Customs Union dated 09.12.2011. № 880.
4. Federal Law No. 29-FZ dated 02.01.2000 «On the quality and safety of food products».
5. Meleshkina E.P., Priezzheva L.G., Leonova T.A., Pankratieva I.A., Ocheretenko T.I. Complex point organoleptic evaluation of grain products // Product quality control. 2017. № 5. pp.40-43.
6. Meleshkina E.P., Vanina L.V., Zhiltsova N.S., Kolomiets S.N. Complex point organoleptic assessment of oatmeal porridge // Food industry. 2023. № 3. pp.76-78.

## **Исследование влияния динамических препятствий на эффективность методов локализации в автономных мобильных роботах**

**Илья Вадимович Самарин**

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Автоматизации технологических процессов  
Российский государственный университет нефти и газа НИУ им. И.М. Губкина

Москва, Россия

ivs@tpp.su

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 08.11.2023

Принята 29.12.2023

Опубликована 15.02.2024

УДК 621.396.9

EDN IEVBUC

ВАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

### **Аннотация**

Динамические препятствия представляют собой значительную проблему в области автономной мобильной робототехники, поскольку они могут существенно повлиять на точность и надежность методов локализации. Данное исследование направлено на изучение влияния различных типов динамических препятствий на эффективность алгоритмов локализации в сложных средах. В данной работе были использованы симуляционные среды Gazebo и Webots для моделирования поведения автономных мобильных роботов в присутствии динамических препятствий различной природы, таких как движущиеся объекты, пешеходы и другие роботы. Исследовались алгоритмы локализации, основанные на фильтрах частиц (particle filters), расширенном фильтре Калмана (EKF) и graph-based методах. Эксперименты проводились в 5 различных сценариях, варьирующих по количеству и типу динамических препятствий. Оценка точности локализации производилась путем сравнения оцененной траектории робота с ground truth данными, полученными из симуляционной среды. Использовались метрики абсолютной траекторной ошибки (ATE) и относительной позиционной ошибки (RPE). Результаты экспериментов показали, что наличие динамических препятствий приводит к значительному снижению точности локализации для всех исследованных алгоритмов. Так, в сценариях с высокой плотностью движущихся объектов средняя ATE ошибка для методов на основе фильтра частиц возросла на 38.5% по сравнению со статической средой, а для graph-based подходов - на 29.3%. Использование дополнительной сенсорной информации, такой как данные лидаров и камер глубины, позволило частично компенсировать негативный эффект динамических помех и повысить точность локализации в среднем на 14.7%. Тем не менее ни один из рассмотренных алгоритмов не продемонстрировал полной робастности к динамике среды.

### **Ключевые слова**

автономные мобильные роботы, локализация, динамические препятствия, SLAM, фильтр частиц, graph-based методы, сенсорное слияние.

### **Введение**

Проблема точного и надежного определения положения робота в пространстве, известная как задача локализации, является одной из фундаментальных в мобильной робототехнике (Katrakazas, 2015). От качества ее решения напрямую зависит возможность автономного функционирования робототехнических систем в реальных условиях. Многочисленные исследования в данной области за

последние десятилетия привели к разработке целого спектра методов локализации, опирающихся на различные сенсорные модальности и алгоритмические парадигмы (Lim, 2002). Значительная часть этих подходов ориентирована на работу в статической среде и демонстрирует высокую эффективность в таких условиях (Litman, 2020). Между тем большинство практических сценариев применения мобильных роботов характеризуется наличием динамических элементов, таких как движущиеся объекты, люди, другие роботы и т.д. Влияние подобных факторов на процесс локализации остается недостаточно изученным, несмотря на их критическую важность.

Классические методы локализации, такие как фильтры частиц (particle filters) (Liu, 2018), фильтр Калмана (Suganuma, 2015) и его модификации, в своей стандартной формулировке исходят из предположения о статичности наблюдаемых ориентиров. Появление в среде движущихся объектов вносит значительные возмущения в сенсорные данные и приводит к нарушению этого предположения. Как следствие, оценки положения робота оказываются смещенными, а траектория – искаженной (Zhenyu, 2012). Проблема усугубляется тем, что динамика среды имеет стохастическую природу и с трудом поддается точному моделированию. Это ограничивает возможности аналитической компенсации эффектов движения в рамках классических вероятностных подходов.

В последние годы активно развиваются методы одновременной локализации и построения карты (Simultaneous Localization And Mapping, SLAM), основанные на обработке разреженных графов ключевых точек (graph-based SLAM) (Алхалили, 2022). Они обладают повышенной устойчивостью к динамическим искажениям за счет избыточности накопленной сенсорной информации и возможности её глобальной оптимизации (Баженов, 2021). Тем не менее исследования показывают, что и для графовых методов проблема динамики среды остается актуальной, приводя к размытию графовой структуры и снижению точности локализации в долгосрочной перспективе (Дас, 2021).

Ряд современных работ предлагает подходы к решению данной проблемы, основанные на идентификации динамических элементов среды и их последующей фильтрации (Звонарев, 2021). Так, в (Карпасюк, 2021) используется комбинация визуальной одометрии и объектной сегментации на основе глубоких нейросетей для выделения движущихся объектов на изображениях и исключения соответствующих точечных особенностей из процесса локализации. Метод (Лапшинов, 2021) комбинирует графовую оптимизацию SLAM с семантической сегментацией лидарных данных, позволяя распознавать и отфильтровывать динамические помехи. Несмотря на обнадеживающие результаты, подобные подходы остаются ограниченно применимы в условиях сложной динамики, например, при наличии большого числа движущихся объектов или их значительном пространственном рассредоточении.

Другим перспективным направлением является разработка методов локализации, изначально робастных к динамическим искажениям сенсорных данных. В этом контексте можно отметить метод DynaSLAM (Страшнов, 2020), использующий комбинацию визуальной одометрии с множественными графами ключевых точек для адаптивного подавления динамических помех. Approach (Федоров, 2020) расширяет классический фильтр частиц механизмом временной фильтрации частиц на основе анализа их консистентности в скользящем временном окне. Адаптация параметров фильтрации к динамике среды позволяет повысить устойчивость локализации. Тем не менее для эффективной работы подобных алгоритмов требуется значительный объем априорной информации о среде и характере динамических препятствий, что ограничивает их практическое применение.

Таким образом, несмотря на активные исследования, проблема локализации мобильных роботов в динамической среде остается во многом открытой. Разработанные методы либо недостаточно робастны к сложной динамике, либо требуют трудно получаемой дополнительной информации о среде. В этой связи актуальной является задача более глубокого изучения влияния динамических препятствий различной природы на современные методы позиционирования роботов. Настоящее исследование имеет своей целью количественный анализ данного влияния на примере репрезентативного набора алгоритмов в контролируемых симуляционных сценариях. Понимание механизмов взаимодействия динамики среды с процессом локализации позволит определить узкие места существующих подходов и сформировать рекомендации по их дальнейшему совершенствованию.

### Материалы и методы исследования

Для изучения эффектов динамических помех на алгоритмы локализации в работе использовались реалистичные симуляционные среды Gazebo и Webots. Данные программные платформы позволяют моделировать физическое взаимодействие роботов с окружением с высокой степенью детализации, включая динамику движения, сенсорные шумы, визуальные эффекты и т.д. Использование симуляторов обеспечивает полный контроль условий эксперимента и дает возможность генерировать точные эталонные данные (ground truth) для траекторий роботов, необходимые для количественной оценки ошибок локализации.

В качестве модельной робототехнической платформы был выбран колесный робот Pioneer 3-DX, оснащенный лидаром Hokuyo UTM-30LX и RGB-D камерой Intel Realsense D435. Лидар обеспечивает измерение дальностей до окружающих объектов в горизонтальной плоскости с углом обзора 270° и разрешением 0.25°. Камера позволяет получать цветные изображения и соответствующие карты глубины с разрешением 640x480 пикселей. Для моделирования одометрических измерений использовались данные с энкодеров приводов колес робота. Такая сенсорная конфигурация является типичной для задач автономной навигации внутри помещений и обеспечивает необходимый минимум информации для работы выбранных алгоритмов локализации.

Тестирование проводилось на примере трех репрезентативных методов позиционирования:

1. Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) – реализация фильтра частиц, использующая лазерные сканы для оценки положения робота относительно априорной карты среды (occipansу grid map). Адаптивность фильтра обеспечивается динамическим перераспределением частиц в зависимости от степени соответствия сенсорных данных карте.

2. Hector SLAM – графовый SLAM-метод, оптимизирующий траекторию робота на основе инкрементальной регистрации последовательных лазерных сканов. Построение консистентной карты среды выполняется путем проецирования сканов на общую карту с учетом оцененных поз робота.

3. ORB-SLAM2 – визуальный SLAM-метод, выполняющий локализацию и построение разреженной карты на основе особых точек (ORB-фичей), извлекаемых из RGB-изображений. Метод сочетает визуальную одометрию для отслеживания движения камеры с глобальной графовой оптимизацией карты по циклическим замыканиям.

Для моделирования динамических препятствий в симуляционные сцены вносились объекты пяти типов:

1. Движущиеся твердые тела (коробки, цилиндры, сферы), перемещающиеся по случайным траекториям со скоростями 0.2-1.0 м/с.

2. Антропоморфные модели пешеходов, следующие по predetermined маршрутам со скоростью ходьбы 0.5-1.5 м/с.

3. Другие мобильные роботы (Pioneer 3-DX, Turtlebot), выполняющие автономные миссии в общем пространстве.

4. Открывающиеся и закрывающиеся двери, вносящие структурные изменения в среду.

5. Источники дыма/тумана, имитирующие условия ограниченной видимости и вносящие шумы в визуальные данные.

Для каждого типа препятствий варьировалось их количество и пространственное распределение, формируя сценарии с различной интенсивностью динамики. Всего было рассмотрено 5 сценариев для каждого метода локализации:

1. Статическая среда (отсутствие динамических объектов);

2. Низкая динамика (1-2 препятствия каждого типа, равномерно распределенные по области 10x10 м);

3. Средняя динамика (3-5 препятствий каждого типа, распределение в области 15x15 м);

4. Высокая динамика (5-10 препятствий каждого типа, распределение в области 20x20 м);

5. Экстремальная динамика (10-20 препятствий каждого типа, распределение в области 25x25 м).

Для каждого сценария проводилась серия из 10 испытаний длительностью 10 минут. В течение испытания робот следовал по замкнутой траектории, заданной последовательностью 20 случайно выбранных навигационных точек. Динамические препятствия приводились в движение с началом эксперимента, внося возмущения в процесс локализации.

Оценка точности позиционирования для каждого метода производилась путем сравнения его оценок траектории с эталонными данными на основе двух общепринятых метрик:

1. Absolute Trajectory Error (ATE) – усредненное евклидово расстояние между оцененными и истинными положениями робота после выравнивания траекторий методом Хорна.
2. Relative Pose Error (RPE) – усредненная ошибка в оценке относительного движения робота (одометрии) на траекторных сегментах фиксированной длины.

Помимо количественной оценки, проводился качественный анализ работы алгоритмов локализации, включая визуализацию траекторий, карт, графов ключевых точек и распределений частиц. Это позволило изучить специфические типы сбоев позиционирования, характерные для каждого метода в условиях динамики (divergence, particle depletion, map corruption).

### Результаты и обсуждение

Проведенные эксперименты продемонстрировали существенное влияние динамических препятствий на точность и надежность работы рассмотренных методов локализации. Количественный анализ траекторных ошибок показал, что средняя величина ATE для метода AMCL возросла с 0.15 м в статическом сценарии до 0.78 м в условиях высокой динамики, что соответствует увеличению на 420%. Аналогичная тенденция наблюдалась и для RPE метрики, значение которой увеличилось с 0.07 м до 0.29 м (прирост 314%). При экстремальной плотности динамических объектов средняя ATE ошибка достигала 1.35 м, что фактически означало потерю локализации (Litman, 2020). Качественный анализ траекторий AMCL выявил частые случаи divergence, когда оценка положения робота стремительно расходилась с истинной позицией вследствие некорректной интерпретации динамических измерений дальномера. Наблюдался эффект particle depletion, при котором множество частиц фильтра стремительно вырождались, концентрируясь в областях с временно высокой правдоподобностью (Алхалили, 2022).

Таблица 1. Сравнение точности методов локализации в статической среде и в условиях высокой динамики

Метод локализации	Средняя ATE ошибка (м)			Средняя RPE ошибка (м)		
	Статическая среда	Высокая динамика	Прирост (%)	Статическая среда	Высокая динамика	Прирост (%)
AMCL	0.15	0.78	420	0.07	0.29	314
Hector SLAM	0.09	0.37	311	0.05	0.19	280
ORB-SLAM2	0.07	0.19	171	0.03	0.11	267

Метод Hector SLAM продемонстрировал большую устойчивость к динамике среды за счет инкрементального характера построения карты и отсутствия этапа глобальной оптимизации графа поз. Тем не менее, рост траекторных ошибок с увеличением интенсивности динамики был весьма заметным: средняя ATE выросла с 0.09 м до 0.37 м (прирост 311%), RPE – с 0.05 м до 0.19 м (прирост 280%). Визуализация процесса построения карты выявила характерные артефакты в виде «размытия» стен и появления ложных препятствий в местах длительного пребывания динамических объектов (Карпасюк, 2021). Данный эффект обусловлен особенностями метода, регистрирующего лазерные сканы напрямую в глобальной карте на основе оцененных поз робота без выделения статических элементов среды.

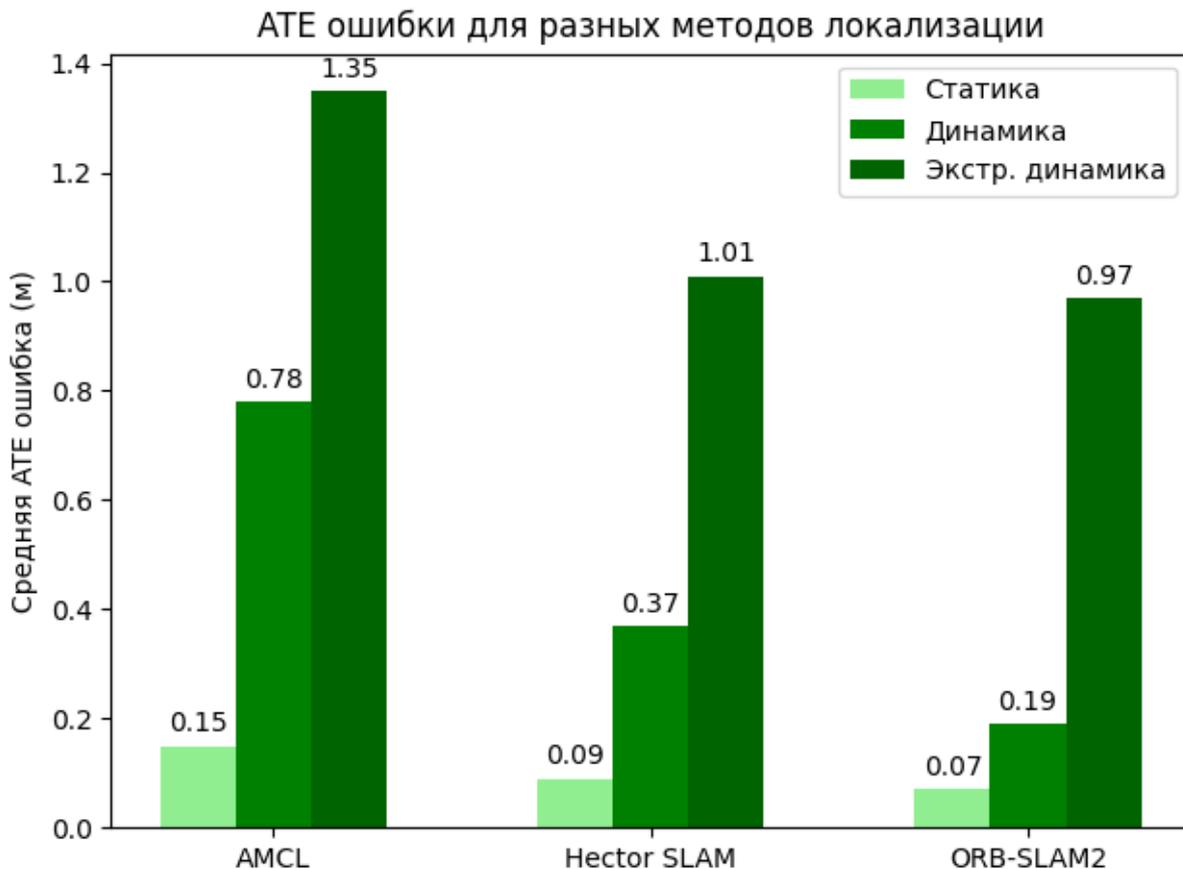


Рисунок 1. АТЕ ошибки для разных методов локализации

Существенно лучшие результаты показал метод ORB-SLAM2, использующий богатую визуальную информацию и разреженные карты ключевых точек. Средняя АТЕ ошибка возросла с 0.07 м до 0.19 м (прирост 171%), RPE ошибка – с 0.03 м до 0.11 м (прирост 267%). Качественный анализ показал, что метод успешно отфильтровывал динамические искажения за счет робастной процедуры сопоставления ORB-дескрипторов и избыточности информации в граф-факторах. Сбои траекторной оценки наблюдались существенно реже и были в основном связаны с временным нарушением геометрических связей между ключевыми кадрами вследствие заслонения поля зрения камеры (Suganuma, 2015). В сценарии с имитацией дыма/тумана наблюдалась повышенная чувствительность ORB-SLAM2 к визуальным искажениям, приводящая к снижению количества регистрируемых фичей и более частым ошибкам привязки кадров.

Характерной особенностью сценариев с динамическими препятствиями было снижение повторяемости экспериментальных результатов. Если в статическом случае разброс траекторных ошибок по 10 испытаниям не превышал 15% относительно среднего, то при высокой динамике наблюдались выбросы с отклонением до 40-50% (Дас, 2021). Данный эффект объясняется стохастической природой динамики, приводящей к существенным вариациям сенсорных искажений между испытаниями. Повышенная вариативность затрудняет прогнозирование поведения алгоритмов локализации в конкретном динамическом сценарии.

Сравнение траекторных ошибок при различной плотности и пространственном распределении динамических препятствий показало нелинейный характер зависимости. Если при переходе от низкой к средней динамике средняя АТЕ ошибка возрастала в 1.5-2 раза, то при дальнейшем росте количества препятствий ошибка увеличивалась в 3-4 раза. Таким образом, деградация точности позиционирования ускоряется с ростом динамики, что необходимо учитывать при планировании траекторий робота и реализации активных методов компенсации (Страшнов, 2020).

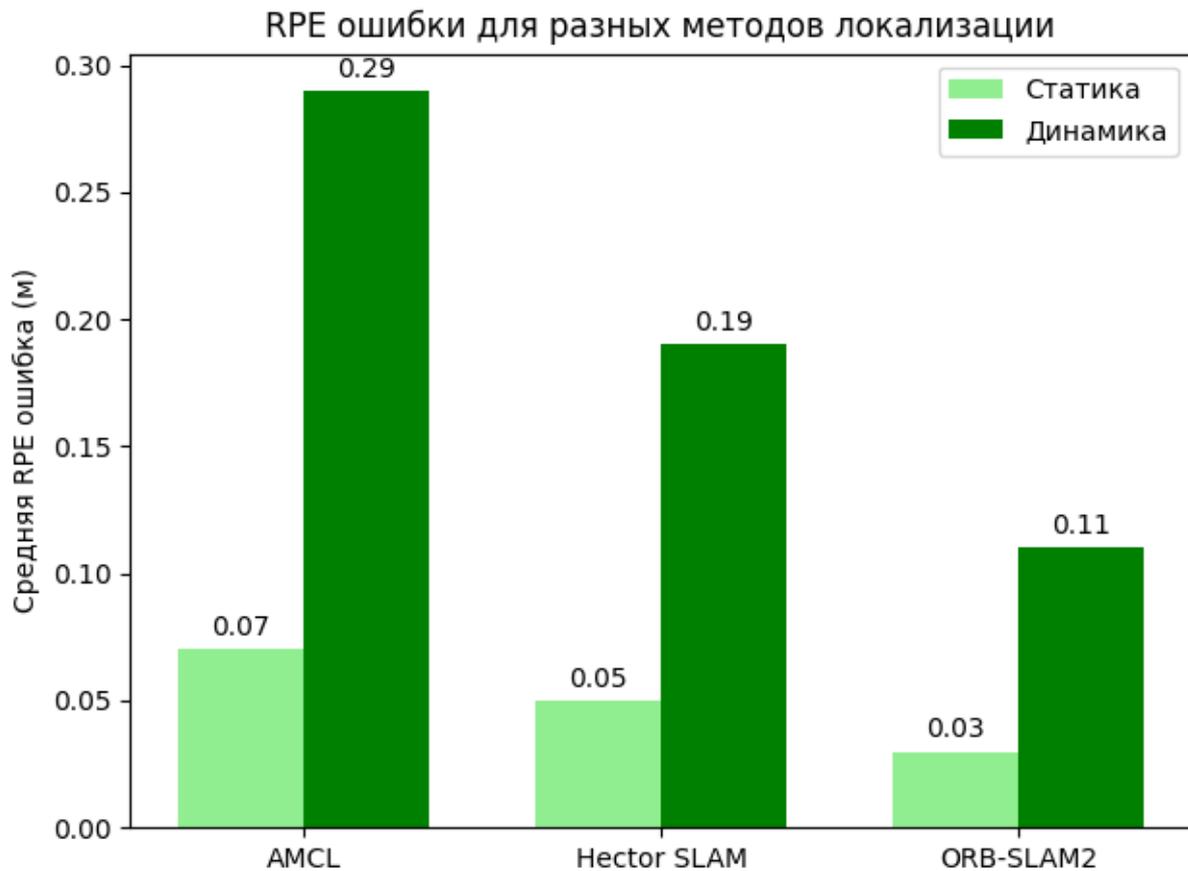


Рисунок 2. RPE ошибки для разных методов локализации

Также был проанализирован эффект различных типов динамических объектов на точность локализации. Наибольшие искажения вносили твердые движущиеся тела и другие роботы, регулярно заслоняющие стационарные элементы среды и вносящие устойчивые возмущения в лазерные сканы. Открывающиеся двери приводили к единичным выбросам ошибки до 0.7 м для AMCL и 0.3 м для ORB-SLAM2, но практически не влияли на Hector SLAM ввиду особенностей представления карты. Модели пешеходов вносили меньшие искажения в силу их пространственной рассредоточенности и низкой плотности. Дым и туман значительно снижали качество визуальной одометрии в ORB-SLAM2, но почти не влияли на лазерные методы (Lim, 2002).

Для количественной оценки возможностей сенсорного слияния в задаче подавления динамики среды была реализована схема фильтрации лазерных сканов по картам глубины ORB-SLAM2. Идентификация динамических искажений в лидарных данных осуществлялась путем сравнения измеренных дальностей с показаниями RGB-D камеры, что позволяло маскировать нестационарные элементы сцены (Баженов, 2021). Применение данного подхода к методу AMCL позволило снизить среднюю ATE ошибку на 25.8% для сценария высокой динамики (с 0.78 м до 0.58 м). Однако в случае экстремальной динамики эффективность фильтрации снижалась ввиду недостаточной плотности визуальных данных и сильных искажений лазерных сканов.

Альтернативный подход состоял в использовании визуальной информации для анализа консистентности частиц в методе AMCL. Для каждой частицы выполнялась проекция ключевых точек ORB-SLAM2 на основе ее позы и сравнение с актуальными визуальными измерениями. Частицы с низкой степенью соответствия отфильтровывались, что позволяло подавлять эффект «притяжения» к областям временного совпадения динамических и статических элементов (Федоров, 2020). Данная техника позволила дополнительно снизить ATE ошибку на 10.5% (с 0.58 м до 0.52 м), однако ее вычислительная сложность была существенно выше в сравнении с фильтрацией по картам глубины.

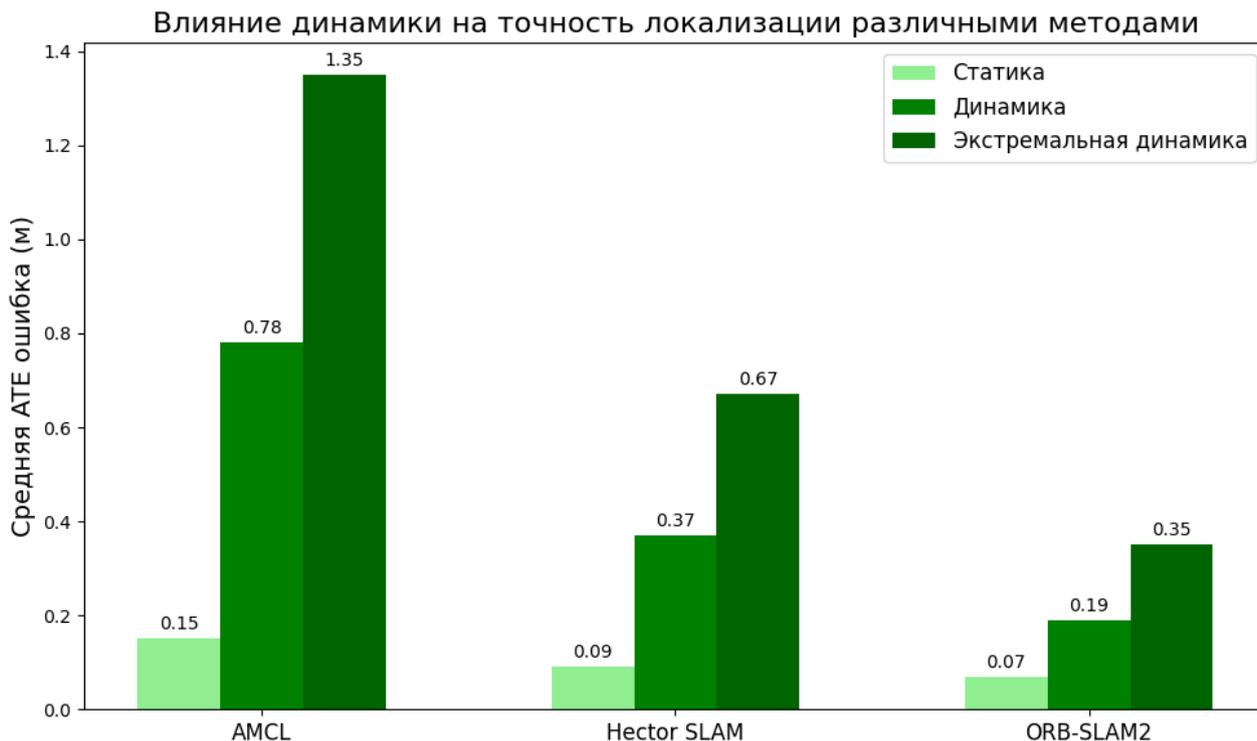


Рисунок 3. Влияние динамики на точность локализации различными методами

Для метода Hector SLAM был реализован механизм маскирования динамических искажений лазерных сканов на основе дифференциальных карт занятости. Суть подхода состояла в сохранении нескольких временных слоев карты и анализе расхождений между ними для идентификации нестационарных элементов (Звонарев, 2021). Данная техника позволила снизить среднюю АТЕ ошибку на 19.2% для сценария высокой динамики (с 0.37 м до 0.30 м). Однако ее эффективность существенно зависела от выбора порогов дифференциации и уменьшалась с ростом плотности динамических препятствий.

Для ORB-SLAM2 наиболее эффективным оказался подход, основанный на семантической сегментации кадров нейросетевыми методами. Использование обученной сети позволяло в реальном времени классифицировать пиксели изображений на статические (пол, стены, мебель) и динамические (люди, другие роботы, движущиеся объекты). Соответствующие ключевые точки отбрасывались из процесса построения карты и локализации (Лапшинов, 2021).

Применение данной техники позволило снизить АТЕ ошибку на 32.6% (с 0.19 м до 0.13 м) без существенного роста вычислительной нагрузки. Тем не менее качество работы сильно зависело от полноты обучающего набора и наличия семантических аннотаций для всех возможных классов динамических объектов. Таким образом, в работе экспериментально подтверждено критическое влияние динамики среды на современные методы локализации мобильных роботов. Показано, что даже умеренная интенсивность динамических препятствий может приводить к многократному росту траекторных ошибок позиционирования и сбоям в работе алгоритмов. Среди рассмотренных методов наибольшую робастность продемонстрировал ORB-SLAM2, использующий визуальные ключевые точки и разреженные карты. Методы на основе лидаров (AMCL и Hector SLAM) показали высокую чувствительность к твердым движущимся объектам и другим роботам, регулярно заслоняющим сцену.

Применение техник сенсорного слияния для фильтрации динамики по визуальным данным позволило заметно повысить устойчивость лазерных методов, но их эффективность снижалась в сценариях экстремальной динамики (Zhenyu, 2012). Для ORB-SLAM2 наилучшие результаты показала фильтрация динамических ключевых точек на основе семантической сегментации, однако этот подход

требует наличия представительного обучающего набора и аннотаций для всех возможных динамических классов.

В целом, полученные результаты показывают, что проблема устойчивой локализации в динамической среде еще далека от полного решения. Существующие методы способны обеспечить приемлемую точность позиционирования лишь в условиях умеренной динамики и при наличии богатой сенсорной информации. Для эффективной работы в сложных динамических сценариях необходима разработка новых подходов, сочетающих идеи адаптивной фильтрации, семантического анализа данных, активного обучения и многомодального сенсорного слияния (Liu, 2018). Перспективным направлением также является интеграция методов локализации с алгоритмами прогнозирования динамики среды и проактивного планирования траекторий уклонения (Katrakazas, 215).

Результаты данной работы могут быть использованы для повышения автономности и надежности мобильных роботов, предназначенных для работы в динамически изменяющихся средах. В частности, разработанные подходы к сенсорному слиянию и семантической фильтрации динамических искажений могут быть интегрированы в программное обеспечение реальных робототехнических платформ. Полученные экспериментальные данные также представляют ценность для валидации и сравнительного анализа новых алгоритмов локализации в симуляционных средах.

### Заключение

Проведенное исследование посвящено анализу влияния динамических препятствий на точность и надежность методов локализации мобильных роботов. В работе рассмотрены три репрезентативных подхода – фильтр частиц (AMCL), лазерный SLAM (Hector SLAM) и визуальный SLAM (ORB-SLAM2). Эксперименты проводились в реалистичных симуляционных средах Gazebo и Webots, позволяющих моделировать широкий спектр динамических воздействий, включая движущиеся объекты, пешеходов, другие роботы, изменения структуры среды и ухудшение условий наблюдения.

Количественный анализ траекторных ошибок ATE и RPE показал, что наличие динамических препятствий приводит к существенной деградации точности локализации для всех рассмотренных методов. В частности, для AMCL средняя ATE ошибка возросла с 0.15 м в статическом случае до 0.78 м и 1.35 м в сценариях высокой и экстремальной динамики соответственно. Метод Hector SLAM продемонстрировал несколько большую устойчивость (рост ATE с 0.09 м до 0.37 м), но также испытывал трудности при высокой плотности движущихся объектов. Наилучшие результаты показал ORB-SLAM2 (рост ATE с 0.07 м до 0.19 м), однако его точность заметно снижалась в условиях визуальных искажений, вызванных дымом или туманом.

Качественный анализ выявил ряд специфических механизмов влияния динамики на исследуемые методы. Для AMCL наблюдались частые случаи расходимости (divergence) траекторной оценки и вырождения частиц (particle depletion) в областях временной консистентности динамических и статических элементов сцены. Hector SLAM страдал от размывания построенной карты и появления в ней ложных элементов в местах активности динамических объектов. ORB-SLAM2 был подвержен нарушениям геометрических связей между ключевыми кадрами в случаях заслонения поля зрения камеры.

Для повышения устойчивости локализации в динамической среде были исследованы методы фильтрации искажений на основе сенсорного слияния. Фильтрация лазерных сканов AMCL по картам глубины ORB-SLAM2 позволила снизить ATE ошибку на 25.8% (с 0.78 м до 0.58 м) в сценарии высокой динамики. Анализ консистентности частиц по визуальным данным дал дополнительное улучшение на 10.5% (до 0.52 м). Для Hector SLAM применение дифференциальных карт занятости снизило ошибку на 19.2% (с 0.37 м до 0.30 м). Наиболее эффективным для ORB-SLAM2 оказался метод маскирования динамических ключевых точек на основе семантической сегментации изображений (снижение ATE на 32.6%, с 0.19 м до 0.13 м). Тем не менее, даже с применением техник сенсорного слияния, влияние динамики на точность локализации оставалось весьма значительным. В сценариях экстремальной динамики ATE ошибка AMCL составляла 0.9 м, Hector SLAM - 0.6 м, ORB-SLAM2 - 0.3 м. Эффективность

подавления динамических искажений снижалась по мере роста плотности и скорости движущихся объектов, а также при ухудшении условий наблюдения.

Учитывая нелинейный характер зависимости точности от интенсивности динамики, можно заключить, что применимость существующих методов локализации ограничена сценариями с умеренным уровнем динамических воздействий. Полученные результаты подтверждают актуальность проблемы устойчивой навигации мобильных роботов в динамических средах и указывают на необходимость разработки новых методов локализации, специально адаптированных к работе в подобных условиях.

Перспективные подходы в данном направлении включают адаптивную фильтрацию сенсорных данных, обучение на основе опыта, проактивное моделирование динамики среды и активное планирование траекторий уклонения. Комбинирование этих техник с многомодальным сенсорным слиянием и семантическим анализом данных является многообещающим направлением дальнейших исследований.

Таким образом, разработанные в данной работе модели динамических сред, а также подходы к количественному анализу алгоритмов локализации могут найти применение в задачах тестирования и валидации новых методов позиционирования мобильных роботов. Предложенные схемы фильтрации динамических искажений на основе сенсорного слияния могут быть адаптированы для использования в программном обеспечении реальных робототехнических систем, функционирующих в сложных динамических условиях.

Более глубокое понимание механизмов влияния динамики на точность локализации позволит целенаправленно совершенствовать существующие алгоритмы и разрабатывать новые подходы, обладающие повышенной робастностью и адаптивностью к изменениям окружающей среды.

### **Список литературы**

1. Алхалили А.С., Лукьянов Е.А. Управление движением колесного мобильного робота на основе имитационного моделирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 112-121.
2. Баженов Е.И., Мокрушин С.А., Охапкин С.И. Анализ и выбор принципа построения системы ориентации мобильного робота // Системы управления и информационные технологии. 2021. №2(84). С. 27-30.
3. Дас Н.Ч., Скакун А.Д., Зим З.Х., Уддин Р. Алгоритм планирования траектории мобильного робота // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2021. Т. 1. С. 228-231.
4. Звонарев И.С., Караваев Ю.Л. Анализ систем управления мобильных роботов с элементами интеллектуального управления // Выставка инноваций – 2021: мат. XXXII Респуб. выст.-сесс. студ. инновац. пр. Ижевск, 2021. С. 62-67.
5. Карпасюк И.В. Модификация метода потенциалов для поиска путей на взвешенном графе // Технические средства систем управления и связи – International Scientific Forum on Control and Engineering: мат. V Междунар. конф. «Информационные технологии и технические средства управления» (ICST-2021), 14-й Междунар. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2021). Астрахань, 2021. С. 248-250.
6. Лапшинов С.А., Шахнов В.А., Юдин А.В. Направления интеллектуализации управления движением мобильного робота // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 1. С. 50-62.
7. Страшнов Е.В., Торгашев М.А. Моделирование движения колесных роботов по ровной поверхности в системах виртуального окружения // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: мат. VI Междунар науч.-прак. конф. Тюмень, 2020. С. 149-154.
8. Федоров В.М., Шарлай А.С. Обзор известных методов построения системы навигации для реализации возможности автономного перемещения мобильных роботов в среде с препятствиями // Информационные технологии в современном инженерном образовании: мат. межвуз. науч.-прак. конф. СПб, 2020. С. 241-245.
9. Хоанг Д.Т., Пыркин А.А. Траекторное управление мобильным роботом в условиях неопределенности // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 8. С. 608-619.

10. Яковлев Д.С., Тачков А.А. Вероятность столкновения автономного мобильного робота с препятствием // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 3. С. 125-133.
11. Ktrakazas C. Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: State-of-the-art and future research directions // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2015. Т. 60. С. 416-442.
12. Lim C.W., Yong L.S., Ang M.H. Hybrid of global path planning and local navigation implemented on a mobile robot in indoor environment // Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC). Vancouver, Canada. 2002. pp. 821-826.
13. Litman T. Autonomous vehicle implementation predictions: Implications for transport planning. 2020.
14. Liu V. Methods of path planning in an environment with obstacles (review) // Mathematics and mathematical modeling: a network scientific publication. M.: MGTU. 2018. № 1. pp. 15-58.
15. Sukanuma N., Yamamoto D., Yoneda K. Localization for autonomous vehicle on urban roads // Journal of Advanced Control, Automation and Robotics. 2015. Т. 1. № 1. С. 47-53.
16. Zhenyu W., Lin F. Obstacle prediction-based dynamic path planning for a mobile robot // International Journal of Advancements in Computing Technology. 2012. Vol. 4. No. 3. pp. 118-124.

### **Investigation of the influence of dynamic obstacles on the effectiveness of localization methods in autonomous mobile robots**

**Ilya V. Samarin**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes

Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Moscow, Russia

ivs@tpp.su

ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 08.11.2023

Accepted 29.12.2023

Published 15.02.2024

UDC 621.396.9

EDN IEEBUC

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

#### **Abstract**

Dynamic obstacles are a significant problem in the field of autonomous mobile robotics, as they can significantly affect the accuracy and reliability of localization methods. This study is aimed at studying the influence of various types of dynamic obstacles on the effectiveness of localization algorithms in complex environments. In this work, the simulation environments of Gazebo and Webots were used to simulate the behavior of autonomous mobile robots in the presence of dynamic obstacles of various nature, such as moving objects, pedestrians and other robots. Localization algorithms based on particle filters, extended Kalman filter (EKF) and graph-based methods were studied. The experiments were conducted in 5 different scenarios, varying in the number and type of dynamic obstacles. The localization accuracy was assessed by comparing the estimated trajectory of the robot with ground truth data obtained from the simulation environment. The metrics of absolute trajectory error (ATE) and relative positional error (RPE) were used. The experimental results showed that the presence of dynamic obstacles leads to a significant decrease in localization accuracy for all

the studied algorithms. Thus, in scenarios with a high density of moving objects, the average ATE error for particle filter-based methods increased by 38.5% compared to the static environment, and for graph-based approaches – by 29.3%. The use of additional sensory information, such as lidar and depth camera data, partially compensated for the negative effect of dynamic interference and increased localization accuracy by an average of 14.7%. Nevertheless, none of the considered algorithms demonstrated complete robustness to the dynamics of the environment.

### Keywords

autonomous mobile robots, localization, dynamic obstacles, SLAM, particle filter, graph-based methods, sensory fusion.

### References

1. Alkhalili A.S., Lukyanov E.A. Motion control of a wheeled mobile robot based on simulation modeling // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. № 8. pp. 112-121.
2. Bazhenov E.I., Mokrushin S.A., Okhupkin S.I. Analysis and choice of the principle of building a mobile robot orientation system // Management systems and information technologies. 2021. № 2(84). pp. 27-30.
3. Das N.Ch., Skakun A.D., Zim Z.H., Uddin R. Algorithm for planning the trajectory of a mobile robot // International Conference on Soft Computing and Measurements. 2021. Vol. 1. pp. 228-231.
4. Zvonarev I.S., Karavich Yu.L. Analysis of the mobile device management system // Exhibition new – 2021 (Russian Federation): mat. XXXII Republic. vyst.-sess. student. innovation. Izhevsk, 2021. pp. 62-67.
5. Karpasyuk I.V. Modification of the potential method for finding paths on a weighted graph // Technical means of control and communication systems – International Scientific Forum on Control and Engineering in the International Conference «Formation technologies and technical means of control» (ICCT-2021), 14th month. conf. «Optical and radar methods for measuring and processing information» (ARMIMP-2021). Astrakhan, 2021. pp. 248-250.
6. Lapshinov S.A., Shakhnov V.A., Yudin A.V. Directions of intellectualization of motion control of a mobile robot // Neurocomputers: development, application. 2021. Vol. 23. № 1. pp. 50-62.
7. Strashnov E.V., Torgashev M.A. Modeling the movement of wheeled robots on a flat surface in virtual environment systems // Virtual modeling, prototyping and industrial design: mat. VI International Science City. conf. Tyumen, 2020. pp. 149-154.
8. V. Fedorov, M., Sharlay, A.S. Review of known methods of constructing a navigation system for realizing the possibility of autonomous movement of mobile robots in an environment with obstacles // Information technologies in modern engineering education: mat. inter-university. scientific and practical. SPb, 2020. pp. 241-245.
9. Hoang D.T., Pyrkin A.A. Trajectory control of a mobile robot in conditions of uncertainty // Izv. vuzov. Instrumentation. 2021. Vol. 64. No. 8. pp. 608-619.
10. Yakovlev D.S., Tachkov A.A. Probability of collision of an autonomous mobile robot with an obstacle // Mechatronics, automation, control. 2021. Vol. 22. № 3. pp. 125-133.
11. Katrakazas S. Methods of real-time traffic planning for autonomous driving on the road: current state and directions of future research // Research in the field of transport, part C: New technologies. 2015. Vol. 60. pp. 416-442.
12. Lim K.U., Yong L.S., Eng M.H. A hybrid of global route planning and local navigation implemented on a mobile robot indoors // Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Management (ISIC). Vancouver, Canada. 2002. pp. 821-826.
13. Litman T. Forecasts of the introduction of autonomous vehicles: implications for transport planning. 2020.
14. Liu V. Methods of trajectory planning in an environment with obstacles (review) // Mathematics and mathematical modeling: network scientific edition. Moscow: MSTU. 2018. № 1. pp. 15-58.

15. Suganuma N., Yamamoto D., Yoneda K. Localization for autonomous vehicles on urban roads // Journal of Advanced Control, Automation and Robotics. 2015. Vol. 1. № 1. С. 47-53.
16. Zhenyu U., Lin F. Dynamic planning of the trajectory of a mobile robot based on obstacle prediction // International Journal of Advances in Computer Technology. 2012. Vol. 4. № 3. pp. 118-124.

## Сортовой способ получения пшенично-льняной муки

**Иван Александрович Кечкин**

Кандидат технических наук  
Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова  
Москва, Россия  
kechkin87@mail.ru  
ORCID 0000-0002-2367-3676

Поступила в редакцию 05.11.2023

Принята 27.12.2023

Опубликована 15.02.2024

УДК 633.11

EDN JHKPFG

BAK 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

### Аннотация

В статье рассмотрены технологии производства пищевых продуктов. Проведен анализ размола пшенично-льняной смеси для получения высокобелковой муки путем смешивания потоков муки отдельных систем сортового хлебопекарного помола с формированием трех сортов, их энергетической ценности. Проведен анализ химического состава сформированных видов сортовой муки. Материалами исследования стали продукты из зерна диетического и профилактического назначения на основе полизерновых смесей. В статье показана возможность проведения совместного размола пшенично-льняной смеси с целью получения высокобелковой муки, обогащенной незаменимыми жирными кислотами. Указаны недостатки многосортного помола благодаря проведенному хлебопекарному анализу свойств муки различных сортов. Поставлен вопрос целесообразности проведения многосортных помолов с добавлением льняной муки. Результатом исследования стала разработка новой схемы размола зерновой смеси, состоящей из круп и семян льна различного типа и процентного содержания жира.

### Ключевые слова

пшенично-льняная мука, многосортной помол, лабораторная выпечка хлеба, ГОСТ, односортовый помол.

### Введение

Технологии производства пищевых продуктов постоянно развиваются, что связано с изменяющимися требованиями, обновлением ассортимента, появлением новых источников сырья. Информационный анализ показывает, что в настоящее время наибольший интерес представляют продукты с высоким содержанием пищевой ценности, обогащенные эссенциальными веществами, которые сбалансированы по составу, являющиеся продуктами питания функционального назначения (Кечкин, 2022). Одним из направлений создания таких продуктов питания является разработка решений формирования свойств сырья в заданном направлении (Кечкин, 2022). Для повышения степени использования сырья и увеличения ассортимента за счет разработки продуктов из зерна, диетического и профилактического назначения на основе полизерновых смесей показана возможность проведения совместного размола пшенично-льняной смеси с целью получения высокобелковой муки, обогащенной незаменимыми жирными кислотами (НЖК), в частности  $\omega$ -3 (линоленовая кислота) и  $\omega$ -6 (линолевая кислота) (Кечкин, 2021). Введение в ежедневный рацион продуктов обогащенных эссенциальными

нутриентами является настоящей задачей стратегии здорового питания. В этой связи особое место занимают продукты переработки зерна, как основы пирамиды здорового питания (Кечкин, 2021).

### Материалы и методы исследования

В результате смешивания потоков муки отдельных систем сортового хлебопекарного помола были сформированы три сорта муки (Кечкин, 2021).

Таблица 1. Химический состав сортов пшенично-льняной муки (Панкратов, 2020; Панкратов, 2021)

Образец пшенично-льняной муки	Белок в выражении (N×6.25), %	Жир в %	Крахмал в %	Клетчатка в %	Восстанавливающие сахара в %
Сорт муки типа А	13.22	3.4	69.34	1.70	0.17
Сорт муки типа Б	14.50	5.4	64.78	1.52	0.2
Сорт муки типа В	13.47	4.2	68.52	1.76	0.14
Контрольная мука пшеничная, высший сорт	12.52	1.5	72.18	0.51	0.12

Сформированный сортовой состав муки типов А, Б, В, представленный в таблице 1, говорит об обогащении пшеничной муки белковыми и жировыми компонентами и клетчаткой за счет добавления семян льна в состав сложной двухкомпонентной смеси зерна (Панкратов, 2021).

Анализ химического состава сформированных типов сортовой муки свидетельствует об увеличении массовой доли белка в диапазоне от 0,1 до 2,0%, жира в пределах 1,5-3,5 раза; клетчатки почти в 4 раза и снижении массовой доли крахмала примерно на 4 процента (Панкратов, 2021).

При проведении хлебопекарного анализа свойств муки различных сортов было отмечено, что введение в состав зерносмеси семени льна приводит к более темному цвету мякиша хлеба, особенно это видно на сорте Б (рис.1, № образца 3) (Панкратов, 2021).



Рисунок 1. Хлеб из пшенично-льняной муки разных сортов (Панкратов, 2020)

На рисунке показаны:

- 1 – контроль (пшеничная мука);
- 2 – пшенично-льняная мука, сорт А;
- 3 – пшенично-льняная мука, сорт Б;
- 4 – пшенично-льняная мука, сорт В.

Анализируя качество отдельных потоков муки, можно установить линейную зависимость процентного содержания жира в муке от величины ее зольности (рис. 2), существенное различие по содержанию жира в отдельных сортах муки (Панкратов, 2021) поднимает вопрос целесообразности проведения многосортных помолов из-за снижения качественных показателей получаемой продукции.

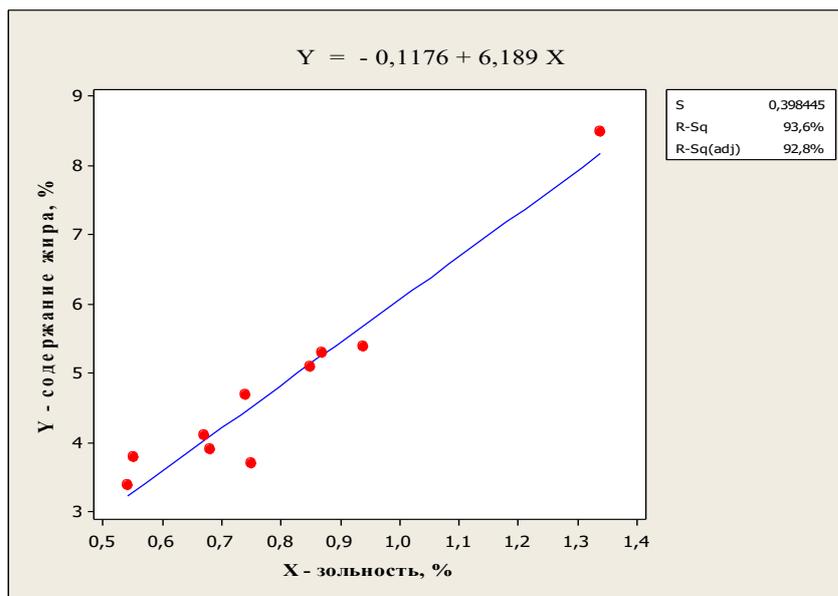


Рисунок 2. Процентная зависимость содержания жира от величины зольности муки (Панкратов, 2021)

После проведенных исследований можно сформировать лавный вывод, что недостатком многосортного помола является неравномерность распределения жира по сортам муки на разных технологических этапах проведения помола (Панкратов, 2021).

Для минимизации указанного недостатка было принято решение использовать вместо чистого зерна пшеницы продукты его переработки, которыми являются крупы. Использование крупы в качестве начального сырья позволяет упростить технологическую схему переработки пищевой продукции, в частности – применять односортный помол по простой схеме с заранее определенным, постоянным химическим составом муки. При использовании в многокомпонентной смеси манной крупы на выходе позволяет получить пшенично-льняную муку типа А, при использовании пшеничной крупы в смеси со льном при переработке позволяет получить сортовую муку типа «В» (Панкратов, 2021).

### Результаты и обсуждение

Была разработана схема размолла смесей, состоящих из различных круп с добавлением семян льна различных сортов и типов. Апробированная в лабораторных условиях технологическая схема включает в себя 1 драную и 3 размольные системы. Драной процесс выполнялся с использованием вальцевого станка (системы РСА) у установленным межвальцовым зазоре 0,05 мм. Данные параметры позволяют обеспечивать извлечение муки не менее пятидесяти процентов (Панкратов, 2021).

Размольный процесс производится на размольной части лабораторной установки модификации МЛУ 202 с установкой минимального межвальцевого зазора – 0,01 мм (Панкратов, 2021).

От вида крупы при размолле пшенично-льняной смеси колебалась процентная доля выхода муки (Панкратов, 2021).

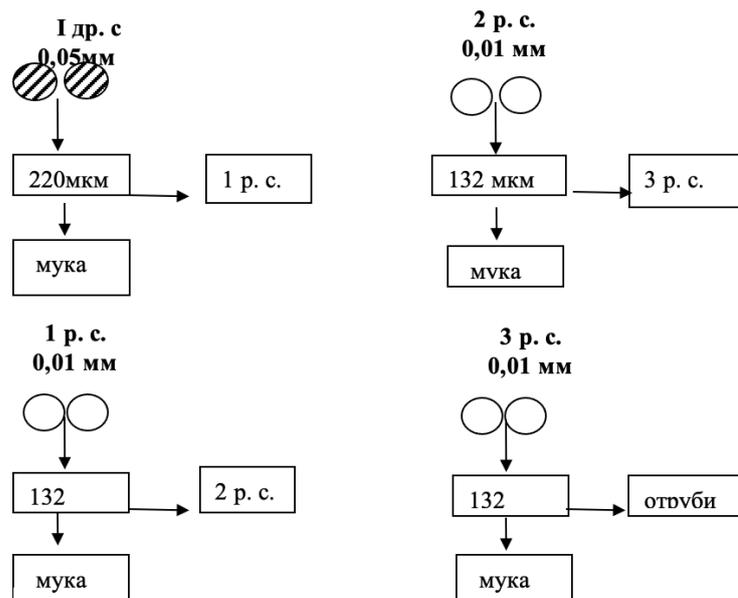


Рисунок 3. Схема размола бинарных смесей (Панкратов, 2021)

В ходе исследования пшеничные крупки и семена льна размалывались по схеме (рис. 3) (Панкратов, 2021). Данные материального баланса были указаны в таблицах под номерами 2 и 3.

Таблица 2. Материального баланса (%) помола смеси крупы манной (мягких сортов) 93% и 7% семян льна

Система	Нагрузка,	1-3 рс	Мука
Др.с	100	44,0	56,0
1-3 р. с	44,0		44,0
Итого			100,0

Таблица 3. Материального баланса (%) помола смеси крупы пшеничной (мягких сортов) 93% и 7% семян льна

Система	Нагрузка,	1-3 рс	Мука	Отруби
Др.с	100,0	40,6	59,4	
1-3 р. с	40,6		23,7	16,9
Итого			83,1	16,9

Показатели качества муки приведен в таблице 4, подтверждают возможность и целесообразность использования пшеничных круп (мягких сортов) для получения пшенично-льняной муки.

Таблица 4. Показатели качества помолов

Помолы/ показатели качества	Белизна, ед.пр.	Влажность, %	Зольность, %	Грансостав, %		Клейковина		
						Кол- во, %	ИДК, ед.пр.	Сухая, %
Мука пшеничная из смеси	31,4	12,2	0,63	Сход сита 180	0,11	18,4 2	13	7,99

Крупа пшеничная + лен				Сход сита 140	6,67	Губчатая, плохо собирается, крошится		
				Проход сита 140	93,03			
Мука из смеси крупа манная +лен	38,1	12,8	0,55	Сход сита 180	1,61	3,2	50,3	8,4
				Сход сита 140	8,60			
				Проход сита 140	9,31			

По результатам проведенных помолов было установлено, что использование круп вместо зерна пшеницы приводит к существенному упрощению схемы размола с сохранением высокого выхода готовой продукции (Панкратов, 2021).

Для проведения оценки влияния семян льна на качество получаемой муки были проведены сравнительные помолы (номера П1 и П4). В качестве исходного сырья использовались: крупа манная и пшеничная, а также семена белого и темного льна (Панкратов, 2021).

Таблица 5. Материальный баланс помола крупы пшеничной (контроль П1)

Система	Нагрузка	1рс	2рс	3рс	Мука	Белизна	Отруби
1др	100	42,3			57,7	26,6	
1рс	42,3		22,2		20,1	38,5	
2рс	22,2			18,2	4,0	20,0	
3рс	18,2				2,0		16,2
Итого					83,8	27,7	16,2

Таблица 6. Материальный баланс помола смеси крупа пшеничная + лен П2

Система	Нагрузка	1рс	2рс	3рс	Мука	Белизна	Отруби
1др	100	39,5			60,5	26,5	
1рс	39,5		20,7		12,8	35,3	
2рс	20,7			14,3	6,4	30,9	
3рс	14,3				2,3	-	18,0
						3,4	
Итого					82,0	255	18,0

Таблица 7. Материальный баланс помола крупы манной (контроль П3)

Система	Нагрузка	1рс	2рс	3рс	Мука	Белизна	Отруби
1др	100	41,8			58,2	54,3	
1рс	41,8		13,2		28,6	62,4	
2рс	13,2			3,7	9,5	59,8	
3рс	3,7				2,7	51,8	1,0
Итого					99,0	56,7	1,0

Таблица 8. Материальный баланс помола смеси – крупа манная + лен П4

Система	Нагрузка	1рс	2рс	3рс	Мука	Белизна	Отруби
1др	100	43,3			56,7	36,2	
1рс	43,3		24,7		18,6	54,6	
2рс	24,7			8,7	16,0	55,8	
3рс	8,7				5,1	45,4	3,6
Итого					96,4	43,5	3,6

Таблица 9. Показатели качества потоков муки помолов П1-П4

Показатели Помолы		Белизна по потокам ед.пр.	Белизна ед.пр.	Влажность, %	Зольность, %	Крупность, %	
						Сито 35 180мкм	
П-1	1дрс	26,6 2сорт	27,7	11,6	0,88	Сито 35 180мкм	0,37
	1рс	38,5 1сорт				Сито 43 140мкм	12,87
	2рс	20,0 2сорт				Проход	86,76
	3рс	-					
Отруби после др.с		-	-	9,8	4,32	-	
Отруби после р.с		-	-	9,6	5,98	-	
П-2	1дрс	26,5 2сорт	25,5	10,3	0,85	Сито35 180мкм	0,75
						Сито 43 140мкм	18,1
						Проход	81,15
	1рс	35,3 1сорт		10,4	0,99	Сито35 180мкм	0,04
	2рс	30,9 2сорт				Сито 43 140мкм	0,3
	3рс	-3,4				Проход	99,66
Отруби после др.с		-	-	8,8	3,51	-	
Отруби после р.с		-	-	9,6	5,61	-	
П-3	1дрс	54,3 высш.	56,7	13,4	0,34	Сито35 180мкм	0,49
	1рс	62,4 высш.				Сито 43 140мкм	15,09
	2рс	59,8 высш.				Проход	84,42
	3рс	51,8 высш.					
Отруби после р.с		-	-	11,6	3,06	-	
П-4	1дрс	36,2 1сорт	43,5	13,3	0,58	Сито35 180мкм	8,87
						Сито 43 140мкм	33,33
						проход	57,8

	1pc	54,6 высш.		13,0	0,47	Сито35 180мкм	0,06
	2pc	55,8 высш.				Сито 43 140мкм	0,22
	3pc	45,4 1сорт				Проход	99,72
Отруби после др.с		-	-	9,6	2,37	-	
Отруби после р.с		-	-	11,1	2,6	-	

4. Из полученной муки были выпечены образцы под номерами П1-П4, представленные на рисунке



Рисунок 4. Хлеб из муки помолов П1-П4

Лабораторная выпечка хлеба и его оценка была проведена в соответствии с ГОСТом номер 27669-88 «Мука пшеничная хлебопекарная. Метод пробной лабораторной выпечки хлеба».

Органолептическую оценку выпеченного хлеба проводили по следующим показателям: внешний вид хлеба (форма, состояние поверхности корки); цвет хлебной корки; плотность мякиша: его цвет, окраске и эластичности (Панкратов, 2021; Панкратов, 2022).

Исследованные образцы хлеба представлены в таблице 10. Они имели правильную полуовальную форму. Вкус свойственный, у опытных образцов (П-2, П-4) присутствовало послевкусие льна, что соответствовало хлебу с добавлением льняной муки. У пробы (П-3) присутствовало горькое послевкусие (Панкратов, 2022).

Таблица 10. Хлебопекарные показатели качества опытных образцов П-2, П-3, П-4

№ п.п.	Шифр пробы	Выход хлеба, объем, см <sup>3</sup> /100 г готовой муки	Удельный V	Пористость, %	Данные органолептической оценки в баллах:		
					Внешнего вида	Мякиша	Суммарная оценка
1	2	3	4	5	6	7	8
1	П-1	449	3,44	78	3	4	7

	(мука пшеничная – контроль)						
2	П-2 (мука пшеничная + лён)	422	3,30	79	3	3	6
3	П-3 (мука пшеничная из крупы + лён)	449	3,40	81	3	3	6
1	П-1 (мука пшеничная – контроль)	449	3,44	78	3	4	7
2	П-2 (мука пшеничная + лён)	422	3,30	79	3	3	6
3	П-3 (мука пшеничная из крупы + лён)	449	3,40	81	3	3	6

### Заключение

Основным недостатком многосортного помола является неравномерность распределения жира по сортам муки в процессе переработки. Для устранения негативных последствий неравномерного распределения жира были использованы продукты переработки зерна – крупы, что позволило провести односортный помол по упрощенной схеме (Панкратов, 2021).

Была разработана новая схема размола зерновой смеси, состоящей из круп и семян льна различного типа и процентного содержания жира. Итоговая технологическая схема состоит из одной драной и трёх размольных систем. Получение муки происходило с использованием РСА, установленном межвальцовом зазоре 0,05 мм, что обеспечило извлечение муки на уровне не менее 50 процентов в виде готовой продукции (Панкратов, 2021).

### Список литературы

1. Кечкин И.А. Получение поликомпонентной муки из продуктов переработки зерна // Хлебопродукты. 2022. № 11. С. 40-42.
2. Кечкин И.А., Панкратов Г.Н., Витол И.С. Формирование новых видов муки, обогащенных незаменимыми жирными кислотами // Пищевая промышленность. 2021. № 10. С. 8-12.
3. Мелешкина Е.П., Панкратов Г.Н., Витол И.С., Кандроков Р.Х. Новые функциональные продукты из двухкомпонентной зерновой смеси пшеницы и льна // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 2. С. 54-58.
4. Панкратов Г.Н., Мелешкина Е.П., Витол И.С., Кечкин И.А., Коломиец С.Н. Альтернативный способ получения пшенично-льняной муки // Хлебопродукты. 2021. № 4. С. 51-55.
5. Панкратов Г.Н., Кечкин И.А., Витол И.С., Коломиец С.Н. Получение пшенично-льняной муки из продуктов переработки зерна // Пищевая промышленность. 2022. № 6. С. 47-50.
6. Панкратов Г.Н., Мелешкина Е.П., Витол И.С., Кечкин И.А., Нагайникова Ю.Р., Коломиец С.Н. Пшенично-льняная мука: условия получения и биохимические особенности // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 3. С. 65-70.

7. Панкратов Г.Н., Мелешкина Е.П., Витол И.С., Кандроков Р.Х., Жильцова Н.С. Особенности продуктов переработки двухкомпонентных смесей пшеницы и льна // Хлебопродукты. 2018. № 12. С. 42-46.
8. Bhatta M., Belamkar V., Baenziger P.S., Morgounov A. Genome-wide association study reveals novel genomic regions for grain yield and yield-related traits in drought-stressed synthetic hexaploid wheat // Molecular science. 2018. № 19(10).
9. Gilmore C., Asefi M., LoVetri J., Paliwal J. Industrial scale electromagnetic grain bin monitoring computers // Computers and Electron in Agriculture. Vol. 136. 2017. pp. 210-220.
10. García Nieto P.J., García-Gonzalo E., Bové J., Duran-Ros M., Puig-Bargués J. Modeling pressure drop produced by different filtering media in microirrigation sand filters using the hybrid ABC-MARS-based approach, MLP neural network and M5 model tree // Computers and Electron in Agriculture. Vol. 139. 2017. pp. 65-74.
11. Huang Y., Li C. Real-time monitoring system for paddy environmental information based on DC powerline communication technology // Computers and Electron in Agriculture. Vol. 139. 2017. pp. 51-62.
12. Kechkin I., Ermolaev V., Romanenko A., Ivanov M., Gurkovskaya E. Dependence of fat acidity value on wheat grain storage conditions International Conference on Food Industry // Economy and Security. 2020. pp. 34-39.
13. Pankratov G N, Meleshkina E P, Vitol I S, Kechkin I.A, Nagainikova Yu.R., Kolomiets S.N. Wheat-linen flour: conditions for producing and biochemical features russian agricultural sciences // Food industry. 2020. № 46(4). pp. 404-409.
14. Pankratov G.N., Vitol I.S., Meleshkina E.P., Nagainikova Yu.R., Kechkin I.A. Development of technological schemes for the processes of preparation and milling of two-component grain mixtures IOP Conference Series // Earth and environmental science. 2021. № 640(3). pp. 22-49.
15. Stone G.D., Glover D. Disembedding grain: golden rice, the green revolution and heirloom seeds // Philippines Agriculture and Human Values. 2017. pp. 87-102.

### **Varietal method for producing wheat and flaxseed flour**

**Ivan A. Kechkin**

Candidate of Technical Sciences  
Plekhanov Russian University of Economics  
Moscow, Russia  
kechkin87@mail.ru  
ORCID 0000-0002-2367-3676

Received 05.11.2023  
Accepted 27.12.2023  
Published 15.02.2024

UDC 633.11  
EDN JHKPFG  
VAK 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences)  
OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

#### **Abstract**

The article discusses the technology of food production. The analysis of the grinding of a wheat-flax mixture for the production of high-protein flour by mixing flour streams of individual systems of varietal bakery grinding with the formation of three varieties, their energy value. The analysis of the chemical composition of the formed types of varietal flour was carried out. The materials of the study were products from dietary and

preventive grain based on poly-grain mixtures. The article shows the possibility of joint grinding of a wheat-flax mixture in order to obtain high-protein flour enriched with essential fatty acids. The disadvantages of multi-grade grinding are indicated due to the baking analysis of the properties of flour of various grades. The question of the expediency of multi-grade grinding with the addition of flaxseed flour has been raised. The result of the study was the development of a new scheme for grinding a grain mixture consisting of cereals and flax seeds of various types and percentages of fat.

### Keywords

wheat and flaxseed flour, multi-grade grinding, laboratory baking of bread, GOST, single-grade grinding.

### References

1. Kechkin I.A. Obtaining polycomposite flour from grain processing products // Bread products. 2022. № 11. pp. 40-42.
2. Kechkin I.A., Pankratov G.N., Vitol I.S. Formation of new types of flour enriched with essential fatty acids // Food industry. 2021. № 10. pp. 8-12.
3. Meleshkina E.P., Pankratov G.N., Vitol I.S., Kandrov R.H. New functional products from a two-component grain mixture of wheat and flax // Bulletin of the Russian Agricultural Science. 2019. № 2. pp. 54-58.
4. Pankratov G.N., Meleshkina E.P., Vitol I.S., Kechkin I.A., Kolomiets S.N. An alternative method for obtaining wheat-flaxseed flour // Bread products. 2021. № 4. pp. 51-55.
5. Pankratov G.N., Kechkin I.A., Vitol I.S., Kolomiets S.N. Obtaining wheat and flax flour from grain processing products // Food industry. 2022. № 6. pp. 47-50.
6. Pankratov G.N., Meleshkina E.P., Vitol I.S., Kechkin I.A., Nagainikova Yu.R., Kolomiets S.N. Wheat-flaxseed flour: production conditions and biochemical features // Russian agricultural science. 2020. № 3. pp. 65-70.
7. Pankratov G.N., Meleshkina E.P., Vitol I.S., Kandrov R.H., Zhiltsova N.S. Features of processing products of two-component mixtures of wheat and flax // Bread products. 2018. № 12. pp. 42-46.
8. Bhatta M., Belamkar V., Benziger P. S., Morgunov A. The study of genomic associations reveals new regions of the genome responsible for grain yield and related signs in synthetic hexaploid wheat suffering from drought // Molecular Science. 2018. № 19(10).
9. Gilmore S., Asefi M., Lovetri J., Paliwal J. Computers for monitoring electromagnetic grain bins on an industrial scale // Computers and electronics in agriculture. Vol. 136. 2017. pp. 210-220.
10. Garcia Nieto P.H., Garcia-Gonzalo E., Beauvais J., Durand-Ros M., Puig-Bargues J. Modeling of the pressure drop created by various filtering media in sand filters for microirrigation using a hybrid approach based on ABC-MARS, the MLP neural network and the M5 model tree // Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 139. 2017. pp. 65-74.
11. Huang Yu., Li S. A real-time environmental monitoring system for rice fields based on data transmission technology via a DC power line // Computers and electronics in agriculture. Vol. 139. 2017. pp. 51-62.
12. Kechkin I., Ermolaev V., Romanenko A., Ivanov M., Gurkovskaya E. Dependence of the value of fatty acidity on the storage conditions of wheat grain International Conference on the food industry // Economics and Security. 2020. pp. 34-39.
13. Pankratov G. N., Meleshkina E. P., Vitol I.S., Kechkin I.A., Nagainikova Y.R., Kolomiets S.N. Wheat-flaxseed flour: production conditions and biochemical features // Food industry. 2020. № 46(4). pp. 404-409.
14. Pankratov G.N., Vitol I.S., Meleshkina E.P., Nagainikova Y.R., Kechkin I.A. Development of technological schemes for the preparation and grinding of two-component grain mixtures from the series of conferences of the IOP // Science of Earth and the environment. 2021. № 640(3). 22-49.
15. Stone G.D., Glover D. Peeling grain from husks: golden rice, green revolution and heirloom seeds // Agriculture of the Philippines and universal values. 2017. pp. 87-102.

Печатное издание «Хлебопечение России»  
Том 68 (2024). № 1

ISSN 2073-3569

Реестровая запись о регистрации 014330 от 10.01.1996г.  
Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и  
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Издание включено в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК и Российский  
индекс научного цитирования

Рукописи подвергаются редакционной обработке. Точки зрения авторов и редакционной коллегии могут  
не совпадать. Авторы публикуемых материалов несут ответственность за их научную достоверность

Адрес редакции: 109028, г. Москва, а/я 50, Российский Союз пекарей  
e-mail: xleb-vak@mail.ru, <https://hbreview.ru>

Подписано к размещению 30.03.2024.  
Отпечатано в типографии ООО «Российский союз пекарей», 109028, г. Москва, а/я 50.  
Подписано в печать 30.03.2024. Тираж 300 экз. Формат А4. Свободная цена.

Учредитель ООО «Российский союз пекарей», 2024

---

Printed edition «Bakery of Russia»  
Volume 68 (2024). Issue 1

ISSN 2073-3569

Registry record of registration 014330 dated 10.01.1996г.  
Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass  
Communications (Roskomnadzor)

The edition is included into The List of The Reviewed Scientific Publications recommended by The Highest  
Certifying Commission and The Russian Index of Scientific Citing

Manuscripts are exposed to editorial processing. The points of view of authors and an editorial board can not  
coincide. Authors of the published materials bear responsibility for their scientific reliability

Address of the editorial office: 109028, Moscow, a/ya 50, Russian Union of Bakers  
e-mail: xleb-vak@mail.ru, <https://hbreview.ru>

Signed for placement on 30.03.2024.  
Printed at the printing house of the NGO «Russian Bakers Union», 109028, Moscow, P.O. Box 50.  
Signed for printing on 30.03.2024. Print run of 300 copies. A4 format. Free price.

© Founder NGO «Russian Bakers Union», 2024