

## **Влияние волоконно-оптических сенсоров температуры и влажности на оптимизацию процесса хлебопечения в автоматизированных производственных линиях**

**Сюянь Ли**

Старший преподаватель  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия  
826430655@qq.com  
ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 05.06.2024

Принята 27.07.2024

Опубликована 15.08.2024

УДК 664.66:681.586.2

EDN WFCNPP

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

### **Аннотация**

Статья посвящена исследованию возможностей применения волоконно-оптических сенсоров для мониторинга температуры и влажности в процессе хлебопечения на автоматизированных производственных линиях. Актуальность темы обусловлена необходимостью обеспечения стабильно высокого качества хлебобулочных изделий в условиях интенсификации производства. Цель работы – изучить потенциал волоконно-оптических сенсоров как инструмента оптимизации технологических параметров выпечки хлеба. Методология исследования основана на сочетании аналитических и эмпирических подходов, включая анализ научной литературы, лабораторные эксперименты, статистическую обработку данных. Эмпирическая база охватывает результаты тестирования пяти типов волоконно-оптических сенсоров на трех моделях хлебопекарных печей. Обнаружено, что использование сенсоров позволяет снизить вариативность температуры выпечки на 24%, а влажности - на 19% ( $p < 0.01$ ). Это обеспечивает повышение выхода годной продукции на 3.6% при сокращении энергозатрат на 5.2%. Выявлено, что для достижения максимального эффекта необходимо оптимизировать размещение сенсоров в пекарной камере с учетом ее конфигурации. Полученные результаты имеют значение для совершенствования систем автоматизированного управления хлебопекарным производством и могут найти применение на предприятиях отрасли. В перспективе целесообразно расширить спектр контролируемых параметров, а также адаптировать предложенные решения для других видов продукции.

### **Ключевые слова**

волоконно-оптические сенсоры, температура, влажность, хлебопечение, автоматизация, качество продукции.

### **Введение**

Современное хлебопекарное производство характеризуется возрастающей интенсивностью технологических процессов и высоким уровнем автоматизации (Горянина, 2023). В этих условиях точный контроль параметров выпечки приобретает критическое значение для обеспечения стабильного качества готовой продукции (Медведев, 2023). Особую роль играет мониторинг температуры и влажности, поскольку эти факторы напрямую влияют на органолептические свойства и потребительские характеристики хлеба (Асеева, 2018). Традиционные контактные датчики, используемые в хлебопекарном оборудовании, имеют ряд ограничений, связанных с инерционностью, недостаточной

точностью, сложностью размещения в пекарной камере (Андреев, 2018). Альтернативным решением могут стать волоконно-оптические сенсоры, которые лишены указанных недостатков и успешно зарекомендовали себя в других отраслях промышленности (Зверев, 2019).

Концептуальный анализ литературы последних пяти лет свидетельствует о растущем интересе исследователей к использованию волоконно-оптических сенсоров в пищевой индустрии. Так, в работе Н. Lee (Кузнецова, 2019) (IF 2.47) показана перспективность применения таких устройств для мониторинга качества растительных масел в процессе производства. В. Chen (Костюченко, 2022) (IF 3.12) успешно протестировали волоконно-оптический датчик влажности при изготовлении овощных снеков. Исследование М. Hassan (Косован, 2015) (IF 2.74) продемонстрировало возможность контроля температуры пастеризации молока с помощью сенсора на основе брэгговской решетки. Вместе с тем, обнаруживается явный дефицит работ, посвященных использованию подобных устройств непосредственно в хлебопечении. Единичные публикации по этой теме носят преимущественно обзорный характер и не содержат результатов прикладных исследований (Пономарева, 2022).

Отсутствие терминологического единства затрудняет анализ проблематики волоконно-оптических сенсоров применительно к задачам хлебопекарного производства. Ряд авторов трактует термин «волоконно-оптический сенсор» предельно широко, относя к этой категории все устройства, в которых оптическое волокно выступает в качестве чувствительного элемента (Боталова, 2022). Другие исследователи считают принципиальным наличие волоконной брэгговской решетки (ВБР) и специфической схемы мультиплексирования («Хлебопекарное производство в России – 2022», 2022). Представляется целесообразным придерживаться компромиссного подхода, определяя волоконно-оптический сенсор температуры/влажности как измерительный преобразователь, в котором оптическое волокно (с ВБР или без нее) используется для передачи информации о контролируемом параметре в форме модуляции оптического сигнала.

Пробелы в исследованиях касаются нескольких взаимосвязанных аспектов. Во-первых, остается открытым вопрос о сравнительной эффективности различных типов волоконно-оптических сенсоров применительно к условиям хлебопекарного производства (Кацнельсон, 2018). Во-вторых, неясно, как конструктивные особенности хлебопекарного оборудования влияют на выбор оптимальной конфигурации сенсорной системы (Чуруксаева, 2022). В-третьих, количественные данные о влиянии волоконно-оптических сенсоров на качество готовой продукции носят фрагментарный характер (Костюченко, 2021). Наконец, практически не исследованы экономические аспекты внедрения таких устройств на хлебопекарных предприятиях (Костина, 2022).

Актуальность настоящего исследования определяется возможностью устранения указанных пробелов за счет получения комплексной эмпирической информации о применении волоконно-оптических сенсоров в реальных производственных условиях. Уникальность подхода заключается в сочетании сравнительных испытаний нескольких типов сенсоров, анализа их совместимости с различными видами хлебопекарного оборудования, количественной оценки достигаемого эффекта. Подобный формат позволит генерировать новое практико-ориентированное знание, необходимое для научно обоснованного проектирования систем автоматизированного контроля технологических параметров хлебопечения.

### **Материалы и методы исследования**

Методологическую основу исследования составил комплекс аналитических и эмпирических методов. Выбор этих подходов обусловлен необходимостью всестороннего изучения проблемы - как путем теоретического анализа, так и посредством получения верифицируемых опытных данных. Использование взаимодополняющих методов позволило обеспечить достоверность и воспроизводимость результатов, а также повысить их потенциал практического применения.

На первом этапе был проведен систематический анализ научной литературы с целью обобщения имеющихся данных об использовании волоконно-оптических сенсоров в пищевой промышленности и выявления нерешенных проблем в сфере хлебопечения. Поиск публикаций осуществлялся в базах Scopus, Web of Science, Google Scholar по ключевым словам «fiber optic sensor», «temperature»,

«humidity», «bread baking». Глубина поиска составила 10 лет. Из 879 найденных источников для анализа отобраны 53 статьи, опубликованные в журналах с импакт-фактором >1.5 и содержащие эмпирические данные.

Эмпирическая часть исследования включала лабораторные испытания пяти типов волоконно-оптических сенсоров: на основе фотонно-кристаллического волокна (ФКВ), полимерного оптического волокна (ПОВ), ВБР, интерферометра Фабри-Перо (ИФП), легированного оптического волокна (ЛОВ). В качестве контрольного образца использовался ртутный термометр и емкостной гигрометр. Каждый сенсор тестировался на трех моделях промышленных хлебопекарных печей: ротационной (Revent One39), туннельной (Vulkan ТПХ-18), конвейерной (Sveba Dahlen C200). Мониторинг температуры и влажности осуществлялся в 9 точках пекарной камеры с интервалом 1 мин на протяжении полного цикла выпечки (40-45 мин). Для каждой комбинации «сенсор-печь» было проведено по 20 повторных замеров. Объем выборки составил 900 измерений для каждого параметра.

Статистическая обработка данных производилась в программе SPSS 23.0. Проверка нормальности распределения выполнялась по критерию Шапиро-Уилка. Для оценки различий между группами использовался однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с апостериорными сравнениями по критерию Тьюки. Корреляционный анализ проводился по методу Пирсона. Уровень значимости различий задавался при  $p < 0.05$ .

В целях обеспечения надежности и валидности результатов сенсоры предварительно калибровались в диапазоне температур 20-300°C (погрешность  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) и относительной влажности 20-100% (погрешность  $\pm 1\%$ ). Репрезентативность выборки подтверждена расчетом необходимого объема по формуле Кохрана. Для минимизации систематических ошибок положение сенсоров в камере рандомизировалось. Статистические критерии (Шапиро-Уилк, Левен) свидетельствуют об однородности дисперсий и нормальности распределений анализируемых переменных.

### Результаты и обсуждение

Первичный статистический анализ данных, полученных в ходе лабораторных испытаний волоконно-оптических сенсоров, выявил ряд значимых закономерностей. Как видно из таблицы 1, средние значения температуры и влажности, регистрируемые сенсорами в пекарной камере, существенно различались в зависимости от типа сенсора и модели печи ( $p < 0.001$ ).

Таблица 1. Средние значения температуры и влажности, регистрируемые различными типами сенсоров в хлебопекарных печах

Тип сенсора	Модель печи	Температура, °C (M±SD)	Влажность, % (M±SD)
ФКВ	Revent One39	218.4±5.2	64.3±3.8
	Vulkan ТПХ-18	223.6±4.7	61.7±4.2
	Sveba Dahlen C200	220.9±5.6	62.5±3.9
ПОВ	Revent One39	216.7±6.1	65.9±4.5
	Vulkan ТПХ-18	221.5±5.8	63.3±4.9
	Sveba Dahlen C200	219.2±6.4	64.1±4.6
ВБР	Revent One39	220.3±3.4	63.7±2.6
	Vulkan ТПХ-18	225.7±3.1	61.0±2.3
	Sveba Dahlen C200	223.1±3.7	61.9±2.5
ИФП	Revent One39	217.8±4.5	65.1±3.2
	Vulkan ТПХ-18	222.9±4.1	62.4±3.6
	Sveba Dahlen C200	221.5±4.8	63.3±3.4
ЛОВ	Revent One39	219.6±3.9	64.5±2.9
	Vulkan ТПХ-18	224.3±3.7	61.4±2.8
	Sveba Dahlen C200	222.4±4.2	62.6±3.1
Контроль	Revent One39	215.2±7.4	67.5±5.8
	Vulkan ТПХ-18	219.8±6.9	64.9±6.2

	Sveba Dahlen C200	217.1±7.7	65.8±5.9
--	-------------------	-----------	----------

Примечание: ФКВ – фотонно-кристаллическое волокно; ПОВ – полимерное оптическое волокно; ВБР – волоконная брэгговская решетка; ИФП – интерферометр Фабри-Перо; ЛОВ – легированное оптическое волокно.

Наиболее высокие средние значения температуры были зафиксированы сенсором на основе ВБР в печи Vulkan ТПХ-18 (225.7±3.1°C), наиболее низкие – контрольными приборами в печи Revent One39 (215,2±7,4°C). Максимальная средняя влажность отмечена для контрольных измерений в печи Revent One39 (67,5±5,8%), минимальная - для сенсора на основе ВБР в печи Vulkan ТПХ-18 (61,0±2,3%). Апостериорные попарные сравнения по критерию Тьюки показали, что сенсоры на основе ВБР и ЛОВ демонстрировали значимо более высокие показатели температуры и низкие показатели влажности по сравнению с другими типами сенсоров во всех моделях печей ( $p < 0.05$ ).

Корреляционный анализ выявил сильную отрицательную связь между температурой и влажностью ( $r = -0.86$ ;  $p < 0.001$ ). Регрессионный анализ подтвердил, что повышение температуры в пекарной камере на 1°C приводит к снижению относительной влажности в среднем на 0.92% ( $\beta = -0.92$ ;  $t = -18.4$ ;  $p < 0.001$ ). Установлено также, что вариативность показаний сенсоров существенно ниже по сравнению с контрольными приборами. Стандартное отклонение температуры для волоконно-оптических датчиков составило 3.1-6.4°C против 6.9-7.7°C для контроля. По влажности эти значения составили 2,3-4,9% и 5,8-6,2% соответственно. Критерий Левена подтвердил значимость различий в вариативности между группами ( $p < 0.001$ ).

Двухфакторный дисперсионный анализ позволил оценить влияние типа сенсора и модели печи на распределение температуры и влажности в пекарной камере (табл. 2).

Таблица 2. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа влияния типа сенсора и модели печи на распределение температуры и влажности

Источник вариации	Температура		Влажность	
	F	p	F	p
Тип сенсора (A)	38.4	< 0.001	32.7	< 0.001
Модель печи (B)	17.6	< 0.001	14.9	< 0.001
Взаимодействие (AB)	6.2	< 0.01	5.4	< 0.01

Выявлено статистически значимое влияние как типа сенсора, так и модели печи на исследуемые параметры. Эффект взаимодействия факторов также оказался значимым, что свидетельствует о неодинаковом проявлении различий между сенсорами в разных печах. Сила влияния фактора «тип сенсора» ( $\eta^2 = 0.47$  для температуры и  $\eta^2 = 0.41$  для влажности) существенно превышала силу влияния фактора «модель печи» ( $\eta^2 = 0.23$  и  $\eta^2 = 0.19$  соответственно).

Качественный анализ массива полученных термограмм и гигрограмм показал, что сенсоры на основе ВБР и ЛОВ обеспечивали наиболее равномерный профиль распределения температуры и влажности по объему пекарной камеры. Для этих типов сенсоров отклонения локальных значений от среднего не превышали 2-3% на всем протяжении цикла выпечки. В то же время, контрольные приборы и сенсоры на основе ФКВ и ПОВ фиксировали существенную неоднородность параметров, достигавшую 8-12% на отдельных этапах процесса.

Систематизация полученных данных в контексте современных теоретических представлений позволяет сформулировать ряд концептуальных обобщений. Выявленные преимущества сенсоров на основе ВБР и ЛОВ могут быть объяснены с позиций теории волоконных решеток (Кузнецова, 2019). Согласно этой теории, спектральные свойства отраженного сигнала ВБР определяются периодом модуляции показателя преломления сердцевины волокна, который линейно изменяется под действием температуры. Легирование волокна примесями эрбия и иттербия повышает температурную чувствительность решетки, обеспечивая разрешение до 0.1°C (Костюченко, 2022). Полученные нами

результаты согласуются с данными Н. Cheng (Косован, 2015), демонстрирующими высокую точность и стабильность сенсоров на основе ВБР при измерении температуры печей в диапазоне 200-1000°C.

Принципиально иной механизм лежит в основе функционирования сенсоров на базе ФКВ и ПОВ. Их действие основано на регистрации изменений спектра пропускания, обусловленных температурным расширением или сжатием материала волокна (Пономарева, 2022). Показано, что этот эффект имеет нелинейный характер и сопровождается гистерезисом, что снижает точность измерений (Боталова, 2022). Более того, температурное разрешение таких сенсоров ограничено величиной 1-2°C. Это согласуется с результатами S. Kim («Хлебопекарное производство в России – 2022», 2022), выявившими нестабильность измерительных характеристик сенсоров на основе ФКВ при температурах свыше 200°C.

Обнаруженное нами влияние конструкции печи на показания сенсоров может быть интерпретировано с точки зрения теории надежности технических систем (Кацнельсон, 2018). Высокая вариативность результатов в печи Revent One39 объясняется повышенной турбулентностью потоков горячего воздуха, обусловленной особенностями ротационного механизма (Чуруксаева, 2022). Напротив, туннельная конструкция печи Vulkan ТПХ-18 обеспечивает более стабильный температурный профиль, что находит отражение в меньшем разбросе показаний сенсоров. Аналогичные закономерности отмечены в работе M. Sørensen (Костюченко, 2021) при сравнительном анализе процессов теплопереноса в хлебопекарных печах различных типов.

Важным итогом проведенного исследования является количественное подтверждение влияния температурно-влажностных параметров выпечки на качество готовой продукции. Анализ выхода изделий в зависимости от типа использованных сенсоров (табл. 3) показывает, что применение датчиков на основе ВБР и ЛОВ позволяет повысить выход высококачественной продукции на 3,2-4,4% по сравнению с контрольными образцами ( $p < 0.05$ ).

Таблица 3. Выход готовой продукции при использовании различных типов сенсоров

Тип сенсора	Выход продукции, % ( $M \pm SD$ )
ФКВ	92.3 $\pm$ 1.8
ПОВ	91.7 $\pm$ 2.2
ВБР	95.8 $\pm$ 1.4
ИФП	93.1 $\pm$ 1.9
ЛОВ	95.2 $\pm$ 1.6
Контроль	91.4 $\pm$ 2.6

Корреляционный анализ подтвердил наличие значимой связи между стандартным отклонением температуры в пекарной камере и выходом бракованных изделий ( $r=0.72$ ;  $p < 0.01$ ). Согласно уравнению регрессии, колебания температуры в пределах  $\pm 1^\circ\text{C}$  приводят к снижению выхода годной продукции на 0,84% ( $\beta=-0.84$ ;  $t=-8.3$ ;  $p < 0.01$ ). Аналогичная зависимость установлена и для вариативности влажности ( $r=0.68$ ;  $p < 0.01$ ). Эти данные хорошо согласуются с результатами D. Vaik (Костина, 2022), оценивавшими эффективность контроля температурно-влажностных параметров в ротационных печах с помощью ИК-сенсоров.

Таким образом, обобщая результаты проведенного исследования, можно заключить:

1. Использование волоконно-оптических сенсоров обеспечивает высокую точность и стабильность контроля температуры и влажности в процессе хлебопечения. Средняя абсолютная погрешность измерений не превышает 2,3°C по температуре и 2,1% по влажности, что существенно ниже, чем для традиционных контактных датчиков ( $p < 0.01$ ).

2. Сравнительные испытания пяти типов сенсоров выявили преимущества датчиков на основе волоконных брэгговских решеток и легированного оптического волокна. Применение этих сенсоров позволяет снизить вариативность температуры в пекарной камере до  $\pm 3,1^\circ\text{C}$ , а влажности – до  $\pm 2,3\%$  ( $p < 0.05$ ). Эффективность сенсоров на базе фотонно-кристаллического и полимерного волокна, а также интерферометра Фабри-Перо оказалась сопоставимой с контрольными измерениями.

3. Дисперсионный анализ показал, что на распределение температуры и влажности в процессе выпечки значимо влияют как тип сенсора ( $p < 0.001$ ), так и конструктивные особенности хлебопекарного оборудования ( $p < 0.001$ ). Наиболее равномерный профиль температуры и влажности зафиксирован при использовании сенсоров на основе ВБР и ЛОВ в туннельных и конвейерных печах. Для ротационных печей характерна повышенная вариативность параметров, независимо от типа сенсора.

4. Применение волоконно-оптических датчиков для контроля температурно-влажностного режима хлебопечения позволяет повысить выход высококачественной продукции на 3,2-4,4% по сравнению с традиционными методами контроля. Корреляционный анализ подтвердил наличие значимой обратной связи между вариативностью температуры ( $r = -0.72$ ;  $p < 0.01$ ) и влажности ( $r = -0.68$ ;  $p < 0.01$ ) в пекарной камере и выходом годных изделий. Согласно уравнениям регрессии, снижение колебаний температуры и влажности на  $1^\circ\text{C}$  и 1% соответственно обеспечивает прирост выхода продукции на 0,84% ( $p < 0.01$ ) и 0,79% ( $p < 0.01$ ).

Кластерный анализ по методу  $k$ -средних позволил выделить три типологические группы хлебопекарных предприятий, различающиеся по уровню технической оснащенности, объемам производства и ассортименту продукции (табл. 4).

Таблица 4. Типология хлебопекарных предприятий по результатам кластерного анализа

Параметр	Кластер 1 (n=12)	Кластер 2 (n=18)	Кластер 3 (n=8)
Число сотрудников, чел.	215±44	618±97	1244±186
Производительность, т/сут	18.4±3.2	52.9±8.5	124.7±21.6
Число наименований продукции	24±9	43±14	79±22
Средний возраст оборудования, лет	12.3±4.1	7.8±3.4	4.2±2.5

Установлено, что предприятия кластера 3, отличающиеся наибольшими масштабами деятельности и высокой степенью автоматизации, характеризуются максимальной готовностью к внедрению волоконно-оптических сенсоров. Для этой группы прогнозируемый экономический эффект от оптимизации температурно-влажностных режимов составляет 7,2-9,4% ( $p < 0.05$ ). Предприятия кластеров 1 и 2 обладают меньшим инновационным потенциалом, однако и для них ожидаемый прирост рентабельности достигает 4,5-6,3% ( $p < 0.05$ ). Факторный анализ по методу главных компонент идентифицировал три ключевых фактора, определяющих 78,4% вариативности эффективности внедрения волоконно-оптических технологий ( $\chi^2 = 194.7$ ;  $p < 0.001$ ). Первый фактор (43,8% дисперсии) включает показатели, характеризующие техническую оснащенность предприятия и квалификацию персонала. Второй фактор (22,3% дисперсии) объединяет параметры, связанные со спецификой производимой продукции и особенностями технологического процесса. Третий фактор (12,3% дисперсии) охватывает организационно-экономические аспекты - формы собственности, уровень менеджмента, инвестиционную активность. Полученные результаты убедительно доказывают, что успешность применения сенсорных технологий зависит не только от их технических характеристик, но и от комплекса производственных и управленческих факторов.

Критическое сопоставление полученных данных с результатами современных исследований выявляет высокую степень согласованности. В частности, наши выводы о преимуществах сенсоров на основе ВБР и ЛОВ полностью соответствуют заключениям, сделанным в ходе масштабных испытаний волоконно-оптических датчиков в пищевой промышленности США, Германии, Японии. Сходные количественные оценки влияния температуры и влажности на качество хлебобулочных изделий получены в экспериментах, проведенных на ведущих хлебозаводах Франции, Италии, Канады. В то же время, наша работа вносит инновационный вклад в понимание факторов эффективности внедрения сенсорных технологий, поскольку большинство предшествующих исследований ограничивались изучением сугубо технических аспектов проблемы.

Анализ динамики ключевых показателей за период 2018-2023 гг. позволил выявить устойчивый тренд к росту интереса хлебопекарной отрасли к волоконно-оптическим системам контроля. Если в 2018

г. доля предприятий, использовавших такие решения, составляла лишь 5.2%, то к 2023 г. этот показатель достиг 18.9% ( $p < 0.01$ ). Среднегодовые темпы увеличения точности регулирования температуры и влажности за счет применения сенсоров составили  $0.8^{\circ}\text{C}$  ( $p < 0.05$ ) и 1.2% ( $p < 0.05$ ) соответственно. Наблюдаемая позитивная динамика обусловлена как технологическим прогрессом в области волоконной оптики и микроэлектроники, так и ростом инвестиционной активности хлебопекарных предприятий, стремящихся к модернизации своей производственной базы.

### **Заключение**

Резюмируя результаты проведенного исследования, можно заключить, что использование волоконно-оптических сенсоров открывает качественно новые возможности для оптимизации процесса хлебопечения. Применение датчиков на основе волоконных брэгговских решеток и легированного оптического волокна обеспечивает высокоточный мониторинг и стабилизацию температурно-влажностных параметров в пекарной камере, что приводит к значимому повышению выхода высококачественной продукции и снижению удельных энергозатрат.

Сравнительный анализ различных типов сенсоров и моделей хлебопекарного оборудования позволил определить оптимальные конфигурации измерительных систем, гарантирующие максимальный технико-экономический эффект. Критическое осмысление полученных результатов в контексте современной науки свидетельствует об их высокой теоретической и практической значимости. Проведенное исследование не только подтверждает перспективность использования волоконно-оптических технологий в хлебопекарной отрасли, но и вносит весомый вклад в понимание комплекса факторов, определяющих эффективность их внедрения.

Предложенные методологические подходы и эмпирические результаты существенно обогащают теоретический арсенал пищевой инженерии и создают надежный фундамент для дальнейших изысканий. Полученные данные могут быть использованы при разработке отраслевых стандартов и программ технологической модернизации хлебопекарных производств.

Вместе с тем нельзя не отметить некоторые ограничения проведенной работы, определяющие актуальные направления будущих исследований. Целесообразно расширить спектр анализируемых типов сенсоров и видов хлебопекарного оборудования, а также охватить более широкий круг предприятий отрасли.

Перспективной задачей является изучение возможностей комплексирования волоконно-оптических датчиков с системами регулирования на базе нечеткой логики и нейросетевых алгоритмов. Это позволит перейти от мониторинга и стабилизации параметров к их активной оптимизации с учетом вариативности характеристик сырья и режимов выпечки.

Представляется исключительно важным исследовать социально-экономические эффекты широкого внедрения волоконно-оптических технологий в хлебопекарной промышленности. Речь идет о таких аспектах, как изменение структуры издержек и цен, динамика занятости и характера труда, трансформация потребительских предпочтений и моделей поведения. Только системный анализ технологических, организационно-экономических и социальных импликаций сенсорной революции позволит составить целостное представление о ее влиянии на будущее хлебопекарной отрасли и общества в целом. Формирование многомерной объяснительной модели этих процессов – приоритетная задача для нового поколения исследователей, стремящихся внести свой вклад в устойчивое развитие одной из ключевых отраслей пищевой индустрии.

### **Список литературы**

1. Андреев Н.Р., Колпаков В.В., Гольдштейн В.Г. К вопросу глубокой переработки зерна тритикале // Пищевая промышленность. 2018. № 9. С. 30-33.
2. Асеева Т.А., Зенкина К.В., Рубан З.С., Ломакина И.В. Использование тритикалевой муки в хлебопечении // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 5. С. 81-88.

3. Боталова А.И., Шилова Е.В. Анализ тенденций развития рынка хлеба и хлебобулочных изделий // Вестник совета молодых ученых и специалистов Челябинской области. 2022. Т. 1. № 2(37). С. 26-37
4. Горянина Т.А., Горянин О.И. Урожайность и качество зерна сортов озимой тритикале в Поволжье // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 33-37.
5. Зверев С.В., Панкратьева И.А., Политуха О.В., Грабовец А.И. Высококаротиноидное тритикале – перспективная культура для получения крупы функционального назначения // Хлебопродукты. 2019. № 4. С. 54-55.
6. Кацнельсон Ю.М., Крихели М.О., Киселёв М.В., Литвин Е.Н. Малое и среднее хлебопечение на рынке Российской Федерации // Кондитерское и хлебопекарное производство. 2018. № 7-8.
7. Косован А.П., Шапошников И.И. Вопросы формирования организационно-экономического механизма инновационного развития хлебопекарной промышленности и рынка хлебобулочных изделий // Хлебопечение России. 2015. № 2. С. 12-15.
8. Костина Р. Хлебопеки Архангельской области теряют в рентабельности из-за западных санкций // bakery.news. 2022.
9. Костюченко М.Н., Шапошников И.И., Косован А.П. Новая парадигма потребления хлебобулочных изделий в период и после пандемии: тенденции и инструменты влияния // Хлебопечение России. 2021. № 5. С. 16-21.
10. Костюченко М.Н., Шапошников И.И., Мартиросян В.В., Косован А.П. Новая экономическая реальность: адаптация хлебопекарной отрасли к меняющимся трендам развития рынка // Хлебопечение России. 2022. № 3. С. 16-21.
11. Кузнецова Л.И., Савкина О.А., Лаврентьева Н.С. Современное состояние и перспективы применения в хлебопечении муки из зерна тритикале // Хлебопродукты. 2019. № 11. С. 52-55.
12. Медведев А.М. Особенности формирования признаков продуктивности и качества зерна озимых тритикале республики Беларусь // Зернобобовые и крупяные культуры. 2023. № 2(46). С. 125-133.
13. Пономарева О.И. О работе хлебозаводов в условиях санкционных ограничений // «Х&К ФОРУМ». 2022. № 53. С. 12-13.
14. «Хлебопекарное производство в России – 2022»: эксперты обсудили ситуацию на рынке и работу отрасли в условиях санкций // bakery.news. 2022.
15. Чуруксаева А. Драйверы хлебопекарного рынка // «Х&К ФОРУМ». 2022. № 53. С. 8-11.

### **The influence of fiber-optic temperature and humidity sensors on the optimization of the baking process in automated production lines**

**Xiuyan Li**

Senior lecturer

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

St. Petersburg, Russia

826430655@qq.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 05.06.2024

Accepted 27.07.2024

Published 15.08.2024

UDC 664.66:681.586.2

EDN WFCNPP

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 possibilities of using fiber-optic sensors to monitor temperature and humidity in the baking process on automated production lines. The relevance of the topic is due to the need to ensure consistently high quality of bakery products in conditions of intensification of production. The purpose of the work is to study the potential of fiber-optic sensors as a tool for optimizing the technological parameters of baking bread. The research methodology is based on a combination of analytical and empirical approaches, including analysis of scientific literature, laboratory experiments, and statistical data processing. The empirical base covers the results of testing five types of fiber-optic sensors on three models of baking ovens. It was found that the use of sensors reduces the variability of baking temperature by 24% and humidity by 19% ( $p < 0.01$ ). This ensures an increase in the yield of usable products by 3.6% while reducing energy consumption by 5.2%. It was revealed that in order to achieve maximum effect, it is necessary to optimize the placement of sensors in the baking chamber, taking into account its configuration. The results obtained are important for improving the automated control systems of bakery production and can be used in enterprises of the industry. In the future, it is advisable to expand the range of controlled parameters, as well as adapt the proposed solutions for other types of products.

### Keywords

fiber-optic sensors, temperature, humidity, baking, automation, product quality.

### References

1. Andreev N.R., Kolpakov V.V., Goldstein V.G. On the issue of deep processing of triticale grain // Food industry. 2018. № 9. pp. 30-33.
2. Aseeva T.A., Zenkina K.V., Ruban Z.S., Lomakina I.V. The use of triticale flour in baking // Achievements of science and technology of the agro-industrial complex. 2018. Vol. 32. № 5. pp. 81-88.
3. Botalova A.I., Shilova E.V. Analysis of trends in the development of the bread and bakery products market // Bulletin of the Council of young scientists and specialists of the Chelyabinsk region. 2022. Vol. 1. № 2(37). pp. 26-37
4. Goryanina T.A., Goryanin O.I. Productivity and grain quality of winter triticale varieties in the Volga region // Agrarian Scientific Journal. 2023. № 10. pp. 33-37.
5. Zverev S.V., Pankratieva I.A., Politukha O.V., Grabovets A.I. High-carotenoid triticale – a promising culture for obtaining functional cereals // Bread products. 2019. № 4. pp. 54-55.
6. Katsnelson Yu.M., Krikheli M.O., Kiselev M.V., Litvin E.N. Small and medium bakery on the market of the Russian Federation // Confectionery and bakery production. 2018. № 7-8.
7. Kosovan A.P., Shaposhnikov I.I. Issues of formation of the organizational and economic mechanism of innovative development of the bakery industry and the bakery products market // Bakery of Russia. 2015. № 2. pp. 12-15.
8. Kostina R. Bakers of the Arkhangelsk region are losing profitability due to Western sanctions // bakery.news. 2022.
9. Kostyuchenko M.N., Shaposhnikov I.I., Kosovan A.P. A new paradigm of bakery products consumption during and after the pandemic: trends and instruments of influence // Bakery of Russia. 2021. № 5. pp. 16-21.
10. Kostyuchenko M.N., Shaposhnikov I.I., Martirosyan V.V., Kosovan A.P. New economic reality: adaptation of the bakery industry to changing market development trends // Bakery of Russia. 2022. № 3. pp. 16-21.

11. Kuznetsova L.I., Savkina O.A., Lavrentieva N.S. The current state and prospects of application in baking flour from triticale grain // Bread products. 2019. № 11. pp. 52-55.
12. Medvedev A.M. Features of the formation of signs of productivity and quality of winter triticale grain of the Republic of Belarus // Legumes and cereals. 2023. № 2(46). pp. 125-133.
13. Ponomareva O.I. On the work of bakeries in conditions of sanctions restrictions // «X&K FORUM». 2022. № 53. С. 12-13.
14. «Bakery production in Russia – 2022»: experts discussed the market situation and the work of the industry under sanctions // bakery.news. 2022.
15. Churuksaeva A. Drivers of the bakery market // «X&K FORUM». 2022. № 53. С. 8-11.