

УДК 664.4:004.932

Визуальная оценка состояния шоколадной массы при помощи системы технического зрения

Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

Э. Д. Шибанов, И. Г. Благовещенский, Е. А. Назойкин

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Эдуард Дмитриевич Шибанов

E-mail: shibanoved@mgupp.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Шибанов, Э.Д., Благовещенский, И.Г., & Назойкин, Е.А. (2023). Визуальная оценка состояния шоколадной массы при помощи системы технического зрения. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 114–124. <https://doi.org/10.36107/spfrp.2023.4.420>

ПОСТУПИЛА: 04.07.2023

ПРИНЯТА: 15.12.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Вопросы повышения качества пищевой 3D печати шоколадом и шоколадной глазурью затрагивались во многих современных исследованиях. Большинство работ посвящены разработке подающих механизмов, систем охлаждения и изменению состава сырья, однако процесс пищевой 3D печати не рассматривался с точки зрения автоматизации. В данной работе предлагается оценивать агрегатное состояние верхнего слоя нанесённого материала, для адаптивного управления режимами печати. Корректное определение текущего состояния нанесённого материала позволит увеличивать или уменьшать скорость печати, влиять на качество изделия и общее время построения модели. В исследовании были проведены практические эксперименты по охлаждению шоколадной массы с использованием системы технического зрения.

Цель: Выявить зависимость оттенка нанесённой шоколадной массы от её температуры при естественном охлаждении, для того чтобы оценить возможность использования технического зрения в качестве визуального датчика в системе автоматизированного контроля за процессом 3D печати шоколадной массой. Согласно гипотезе исследования, агрегатное состояние нанесённого материала возможно контролировать при помощи системы технического зрения, на основании изменения его оттенка.

Материалы и методы: В качестве объекта исследования выступал процесс естественного охлаждения жидкой шоколадной массы (шоколадная глазурь Belgostar и бельгийский шоколад Callebaut). Были проведены практические эксперименты по охлаждению сырья, в результате которых получены числовые данные. Методом анализа и чистки данных были получены отфильтрованные значения, по которым построены графики зависимости средних цветовых значений каналов: «R», «G», «B» в цветовом пространстве RGB от температуры и времени охлаждения. Для изучения графиков использовался метод визуального анализа. Для контроля цветности сырья была использована Web-камера, компьютер и вспомогательное ПО на основе библиотеки OpenCV. Исследованы условия освещения для проведения визуальной оценки агрегатного состояния шоколада при помощи Web-камеры. Для проведения эксперимента был использован светорассеиватель и несколько источников освещения (3000K, 4000K, 5000K).

Результаты: Выявлена зависимость оттенка нанесённой шоколадной массы от её температуры при естественном охлаждении. В ходе визуального анализа построенных графиков установлена тенденция резкого изменения цветности образцов по всем цветовым каналам «R», «G», «B» в момент начала кристаллизации. Выявлен наиболее информативный цветовой канал - «B», показавший наибольшую амплитуду изменения в момент кристаллизации во всех экспериментах, как для глазури, так и для шоколада. Наибольшее изменение цветности наблюдается при освещении с цветовой температурой 3000K (тёплый свет).

Выводы: Система технического зрения способна зафиксировать изменение цветности шоколадной массы, в процессе её охлаждения. Момент начала кристаллизации шоколадной массы совпадает с моментом резкого изменения её цветности, что указывает на наличие взаимозависимости между оттенком шоколадной массы и её агрегатным состоянием. Для фактического определения момента начала процесса кристаллизации необходимо провести анализ графика изменения цветности и найти аномальное и нехарактерное изменение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

3D печать; шоколад; пищевые аддитивные технологии; техническое зрение; анализ данных; техническое зрение в 3D печати; техническое зрение в пищевой промышленности

Visual Assessment of the State of the Chocolate Mass Using a Vision System

Russian Biotechnological University,
Moscow, Russian Federation

Eduard D. Shibarov, Ivan G. Blagoveshchensky, Evgeny A. Nazoykin

CORRESPONDENCE:

Eduard Dmitrievich Shibarov

E-mail: shibaroved@mgupp.ru

DATA AVAILABILITY:

Data from the current study are available upon request from the corresponding author.

FOR CITATIONS:

Shibarov, E.D., Blagoveshchensky, I.G., & Nazoykin, E.A. (2023). Visual assessment of the state of the chocolate mass using a vision system. *Storage and Processing of Farm Products*, (4), 114–124. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.4.420>

RECEIVED: 04.07.2023

ACCEPTED: 15.12.2023

PUBLISHED: 30.12.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: The issues of improving the quality of food 3D printing with chocolate and chocolate glaze have been addressed in many modern studies. Most of the research is devoted to the development of extruders, cooling systems and changes in the composition of raw materials, but the 3D food printing process has not been considered from the point of view of automation. In this work, it is proposed to evaluate the aggregate state of the top layer of the applied material for adaptive control of printing modes. Correct determination of the current state of the material will allow you to increase or decrease the application speed, influence the quality of the product and the overall time of constructing the model. The study conducted practical experiments on cooling chocolate mass using a vision system.

Purpose: To reveal the dependence of the shade of the applied chocolate mass on its temperature during natural cooling, in order to evaluate the possibility of using technical vision as a visual sensor an automated control system for the process of 3D printing with chocolate mass. According to the research hypothesis, the aggregate state of the applied material can be controlled using a technical vision system, based on changes in its shade.

Materials and Methods: The object of the study was the process of natural cooling of liquid chocolate mass (Belgostar chocolate glaze and Belgian Callebaut chocolate). Practical experiments on cooling raw materials were carried out, as a result of which numerical data were obtained. Using the method of data analysis and cleaning, filtered values were obtained, from which graphs were constructed of the dependence of the average color values of the channels: "R", "G", "B" in the RGB color space on temperature and cooling time. To study the graphs, the method of visual analysis was used. To control the color of raw materials, a Web camera, a computer and auxiliary software based on the OpenCV library were used. Lighting conditions were studied to conduct a visual assessment of the state of aggregation of chocolate using a Web camera. To conduct the experiment, a light diffuser and several light sources (3000K, 4000K, 5000K) were used.

Results: The dependence of the shade of the applied material on its temperature during natural cooling was revealed. In the course of visual analysis of the constructed graphs, a tendency was established for a sharp change in the color of the samples in all color channels "R", "G", "B" at the time of the onset of crystallization. The most informative color channel was revealed - "B", which showed the largest amplitude of change at the moment of crystallization in all experiments, both for glaze and for chocolate. The lighting conditions for visual assessment of the state of aggregation of chocolate using a Web camera have been studied. The greatest change in color is observed under illumination with a color temperature of 3000K (warm light).

Conclusion: The technical vision system is capable of recording a change in the color of the chocolate mass during its cooling: the moment of the beginning of crystallization of the chocolate mass coincides with the moment of a sharp change in its color, which indicates the presence of an interdependence between the shade of the chocolate mass and its state of aggregation. To actually determine the crystallization process begins, it is necessary to analyze the graph of color changes and find an anomalous and uncharacteristic change.

KEYWORDS

3D printing; chocolate; food additive technologies; vision; data analysis; vision in 3D printing; vision in the food industry

ВВЕДЕНИЕ

3D печать пищевыми ингредиентами — одно из перспективных и развивающихся направлений (Семенов и др., 2021; Скоморохова и др., 2021), имеющее особое значение для решения задач персонализированного питания (Eswaran et al., 2023; Soni et al., 2022). В национальной технологической инициативе FoodNet пищевые аддитивные технологии рассматриваются в качестве одного из инструментов развития пищевой промышленности. Исследователи по всему миру активно изучают и разрабатывают технологии печати пищевыми продуктами (Oral et al., 2021; Ma & Zhang, 2022). Большинство опубликованных исследований по теме посвящены экструзионной 3D печати гелеобразными материалами (Zhu et al., 2022; Agarwal et al., 2021). В том числе и печати шоколадом, различными видами глазурей и прочими кондитерскими ингредиентами (Godoi et al., 2016; Izdebska & Zolek-Tryznowska, 2016; Karavasili et al., 2020). Особый интерес вызывает 3D печать шоколадом, так как она позволяет создавать различные фигуры, украшения для тортов, сладкие открытки, и брендовые подарки (Lanaro et al., 2019). Однако на текущем этапе развития 3D печать шоколадом имеет ряд недостатков, в том числе, низкую скорость печати и кропотливую настройку параметров, что вызывает трудности при печати сложных трёхмерных моделей (Rando & Ramaioli, 2021.).

Для оценки пригодности продуктов к 3D печати обычно ориентируются на их реологические свойства (Outrequin et al., 2022). Проводят исследования с целью изменения свойств исходного сырья, чтобы повысить его пригодность к печати. Например, путём введения в состав шоколада различных добавок, в том числе стеарат магния для улучшения проходимости потока и увеличения стабильности печати (Mantihal et al., 2017; Мартеха & Андреев, 2021). Проводились исследования по приготовлению шоколада с пониженным содержанием жиров (You et al., 2023). Для увеличения скорости печати, предлагается дополнительно охлаждать слой наносимого шоколада. Lanaro et al. (2017) представили принтер и конструкцию системы охлаждения, позволяющую печатать более сложные объекты. Благодаря охлаждённому потоку воздуха, подаваемого в зону печати, верхний слой шоколада застывает быстрее, что позволяет увеличить общую скорость печати и формировать выступающие элементы без провисания.

Благовещенский и соавторы (2020) сделали заключение о необходимости автоматизированного контроля за процессом пищевой 3D печати шоколадом, с использованием системы технического зрения и интеллектуальных технологий. Их применение поможет упростить процесс подбора параметров печати для нового материала, а также повысить стабильность качества печати. Интеграция машинного обучения и традиционных алгоритмов управления позволяет обеспечить управление с обратной связью, что является перспективным направлением развития аддитивных технологий (Tamir et al., 2023). Уже известны попытки разработать системы автоматизированного контроля за процессом 3D печати пластиком и даже бетоном (Holzmond & Li, 2017; Nuchitprasitchai et al., 2017; Straub, 2015). Однако подобных решений для контроля качества пищевой 3D печати предложено не было. Chachlioutaki et al. (2022), Mohapatra et al. (2022), Lafeber et al. (2021) исследовали свойства и поднимали вопросы качества лекарств, напечатанных на 3D принтере, которые были решены лабораторным путём.

Сегодня системы технического зрения широко применяются при анализе проблемных участков производственного процесса в пищевой промышленности (Аднодворцев и соавт., 2022; Благовещенский и соавт., 2016; Благовещенский и соавт., 2015), а интеллектуальные и нейросетевые технологии позволяют корректировать настройки технологического процесса (Петряков и соавт., 2018; Ребус и Благовещенский, 2022; Благовещенский и соавт., 2022). Компьютерное зрение может найти свое применение и в области пищевых аддитивных технологий, для контроля состояния наносимого шоколада, а также для определения степени готовности мучных изделий или уровня прожарки мяса, в режиме реального времени.

На основании практического опыта, результатов экспериментальных исследований и наблюдений, были выявлены маркеры, которые могут быть использованы при автоматизированном контроле технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадных изделий (Благовещенский и соавт., 2020). Одним из таких показателей является агрегатное состояние нанесённого материала, которое оказывает ключевое влияние на скорость выращивания трёхмерного изделия. При недостаточной интенсивности застывания

материала приходится принудительно ограничивать скорость его нанесения, так как уложенный слой шоколада ещё не успел застыть, а на него уже наносится новый. Под весом вновь нанесённого слоя, предыдущий — теряет свою форму и деформируется. Таким образом готовый продукт получается искажённым и не соответствует заданной трёхмерной модели. Для того, чтобы оптимизировать процесс: сохранить точность печати и уменьшить общее время выращивания трёхмерного изделия, необходимо оценивать состояние текущего слоя шоколада в режиме реального времени и оказывать влияние на скоростные параметры нанесения материала печати в зависимости от интенсивности его застывания, площади слоя, окружающей температуры и т.д.; ограничивать скорость там, где это действительно необходимо, и увеличивать скорость, если шоколад успевает застывать быстрее, чем наносится слой (Rando P & Ramaioli, 2021.).

Цель данного исследования: выявить зависимость оттенка нанесённой шоколадной массы от её температуры при естественном охлаждении, для того чтобы оценить возможность использования технического зрения в качестве визуального датчика в системе автоматизированного контроля за процессом 3D печати шоколадной массой. Это позволит контролировать состояние нанесённого сырья и адаптивно управлять параметрами текущего процесса печати. В ходе исследования были решены следующие задачи: разработка вспомогательной программы для обработки видео сигнала, организация эксперимента, обработка полученных данных, анализ результатов. Согласно гипотезе исследования: агрегатное состояние нанесённого материала возможно контролировать при помощи системы технического зрения, на основании изменения его оттенка. Чтобы подтвердить наше предположение, необходимо обнаружить зависимость цветности шоколадной массы от её температуры, в момент охлаждения и фазового перехода из жидкого состояния в твёрдое. Подтверждение данной гипотезы задаст дальнейшее направление работы в области автоматизированного контроля технологическим процессом 3D печати шоколадной массой. Вопрос об оценке агрегатного состояния шоколада наносимого слоя может быть решён при помощи визуального контроля с использованием системы технического зрения (Web-камеры).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект

В качестве объекта исследования выступает процесс естественного охлаждения жидкой шоколадной массы, равномерно распределённой по поверхности. Для сравнения использовалось 2 материала: бельгийский шоколад «Callebaut» (без проведения процесса темперирования) и шоколадная глазурь марки «Belgostar».

Оборудование

Для проведения практических экспериментов нами была собрана лабораторная установка, представленная на Рисунке 1.

Для нагрева сырья (6) использовалась водяная баня (1). Для измерения температуры применялся электронный термометр (2) с ценой деления 0.1 °С. Для фиксации видеопотока была использована камера «Logitech c922 pro stream» (3). При помощи ноутбука (4) происходила запись и обработка данных. В качестве источника света поочередно были использованы светодиодные лампы мощностью 5 Ватт и цветовой температурой равной 3000К, 4000К и 5000К, а также был использован свет рассеиватель (5).

Рисунок 1

Сборка лабораторного оборудования для проведения эксперимента



Методы и инструменты

Была проведена серия практических экспериментов, предварительная чистка данных и анализ результатов, представленных в виде графиков. Для получения и обработки первичных данных было использовано вспомогательное программное обеспечение на основе библиотеки OpenCV для того, чтобы выделить 3 цветовых составляющих (Red, Green, Blue) в цветовом RGB пространстве, из общего кадра с охлаждаемым сырьём. В режиме реального времени происходило измерение этих составляющих с частотой 30 кадров в секунду. Численные значения параметров цветности, текущая температура и время записывались в базу данных на протяжении каждого эксперимента. По достижении шоколадом твёрдой фазы, проведение текущего эксперимента завершалось, менялись условия и проводился следующий.

Процедура исследования

В ходе эксперимента сырьё нагревалось до температуры 40 °С, тщательно перемешивалось, а затем проходило его естественное охлаждение при комнатной температуре под объективом камеры, которая фиксировала его оттенок. Масса остужаемого материала в данном эксперименте значение не имеет, и влияет только на длительность застывания. Температура, при которой начиналась запись видеоряда, составляла 25 °С для шоколада и 38 °С — для глазури. Параллельно с этим устанавливался секундомер, показывающий время, прошедшее с начала эксперимента естественного охлаждения, и термометр, показывающий текущую температуру шоколадной массы. Для чистоты эксперимента освещение в помещении должно отвечать нескольким критериям. Во-первых, оно должно быть рассеянным, так как точечные источники света создавали блики на поверхности шоколадной массы. Во-вторых, необходимо использование источников света с разной цветовой температурой (от 3000K до 5000K) для того, чтобы отметить существует ли зависимость между выбранным источником света и качеством полученных данных о цветности шоколада. Всего было поставлено около 10 экспериментов, 5 из которых были обработаны, рассчитаны и использованы для дальнейшего изучения.

Анализ данных

Для того чтобы зафиксировать изменения оттенка сырья от его агрегатного состояния, были построены графики зависимости цветности шоколада и температуры от времени для каждого эксперимента. Полученные данные обрабатывались в программе MS Excel. Исходное количество данных о цветности было эквивалентно числу кадров видеопотока (30 кад/сек) и было слишком избыточным для нашего эксперимента. Поэтому оно было уменьшено до 1 кадра в секунду, путём нахождения средних значений. Затем была построена сводная таблица, со столбцами «Время, параметры цветности R, G, B и температура» (Таблица 1), графики изменения температуры от времени и графики, отражающие изменения цветности шоколада в зависимости от времени для каждого из цветовых каналов. Каждый цветовой канал может принимать значения в диапазоне от 0 до 1, в зависимости от интенсивности спектра.

Таблица 1

Необработанные данные, получаемые в ходе одного эксперимента

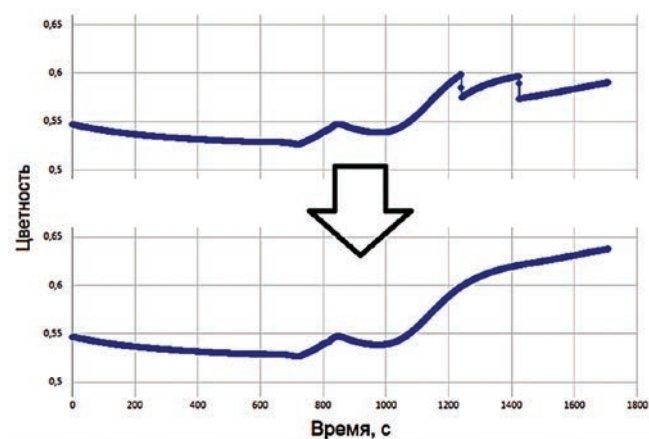
Время (сек)	R	G	B	Температура
1	0,5089	0,451497	0,424007	42,5
2	0,508909	0,451515	0,424083	42,5
3	0,508817	0,451384	0,423947	42,5
..	..	..	..	..
2027	0,557960	0,523861	0,509077	25,2

После этого данные экспериментов были проанализированы на наличие «выбросов». Они возникали при изменении окружающих условий, например, при резком изменении освещения в комнате или при возникновении тени во всём кадре. Выбросы характерны тем, что происходят сразу во всех цветовых спектрах одновременно. Для получения сглаженных графиков была проведена чистка данных (Рисунок 2). В результате чего удалось получить финальные графики зависимости изменения цветности от температуры, которые отражают ключевую информацию.

Стоит отметить, что практически в половине результатов поставленных экспериментов присутствовали выбросы.

Рисунок 2

Чистка данных от выбросов



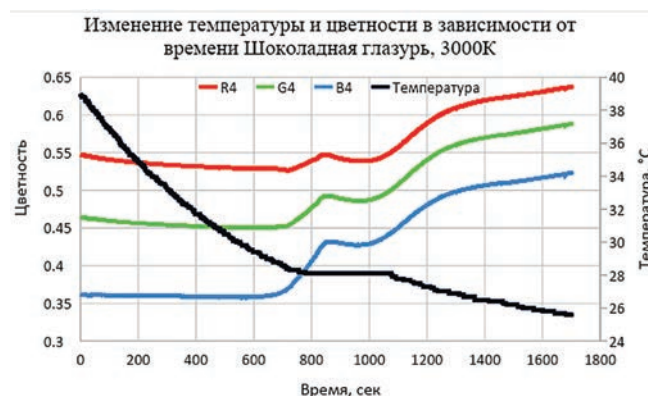
Для дальнейшего анализа графики зависимости цветности от температуры по каждому из цветовых каналов были сведены в общий график для каждого эксперимента. Это позволило выявить наиболее информативный «амплитудный» цветовой канал. Таким образом были обработаны данные со всех экспериментов. Сведённые графики используются для дальнейшей демонстрации результатов экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы подтвердить или опровергнуть гипотезу о том, что при помощи системы технического зрения возможно оценить состояние шоколадной массы, ориентируясь на изменение её оттенка, необходимо наглядное представление результатов измерений параметров цветности сырья с течением времени в виде графиков. Далее необходимо провести визуальный анализ графиков и сопоста-

Рисунок 3

Глазурь, 3000K



вить значения температуры и цветности. В сводной Таблице 2 представлена информация о материалах и условиях освещения для серии проведённых экспериментов. Для каждого эксперимента были построены графики зависимости цветности и температуры от времени охлаждения. Для наглядности на графиках синими вертикальными линиями были отмечены периоды времени начала и конца отверждения, наблюдаемые в ходе эксперимента. Визуальный анализ графиков позволит обнаружить зависимость цветности шоколадной массы от её температуры или опровергнет выдвинутую гипотезу.

По полученным данным были построены графики изменения температуры и цветности в зависимости от времени для каждого эксперимента и представлены на Рисунках 3, 4, 5, 6, 7. Сведение на графике значений цветности по всем каналам (RGB) позволяет сопоставить время начала и завершения кристаллизации с изменениями, которые происхо-

Таблица 2

Основная информация о проведённых экспериментах

№	Материал	Цветовая температура, °K	Т. начала крист., °C	Время отверждения, сек.
1	Шоколадная глазурь «Belgostar»	3000	28,1	296
2	Шоколадная глазурь «Belgostar»	4000	28,4	227
3	Шоколадная глазурь «Belgostar»	5000	28,3	189
4	Шоколад «Callebaut» не темперированный	3000	24,1	283
5	Шоколад «Callebaut» не темперированный	5000	23,1	749

Рисунок 4

Глазурь, 4000K

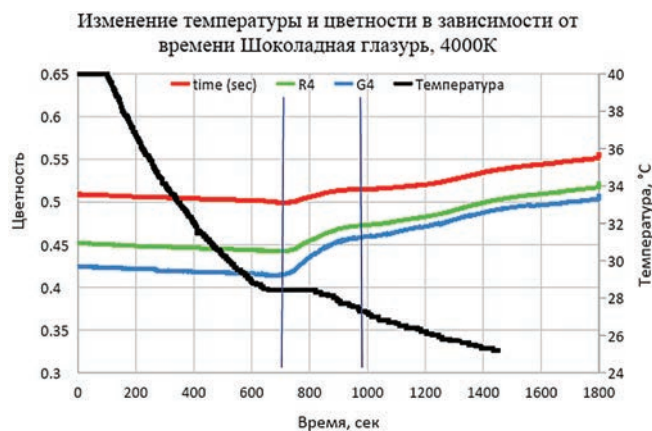


Рисунок 5

Глазурь, 5000K

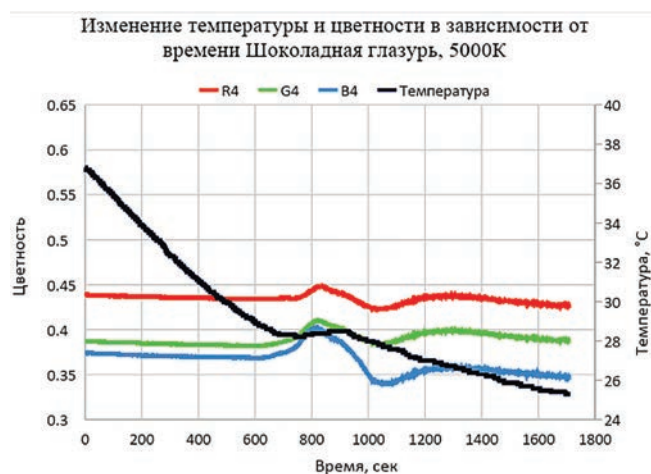


Рисунок 6

Шоколад, 3000K

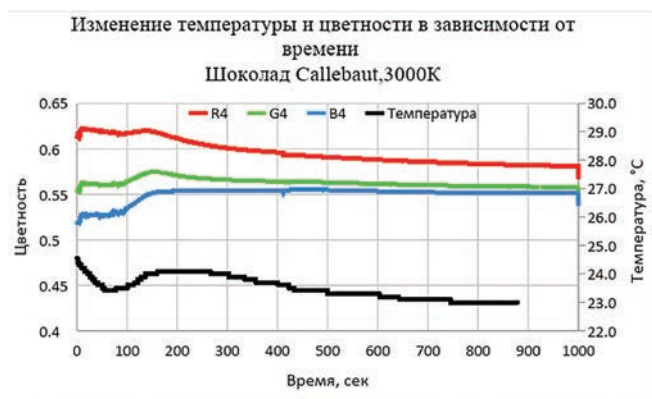
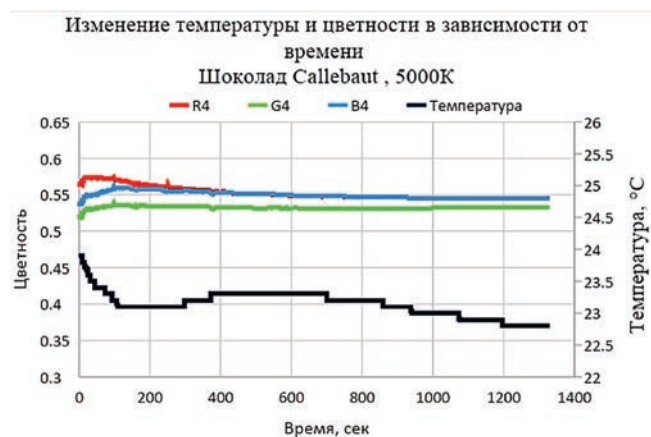


Рисунок 7

Шоколад, 5000K



дят на каждом цветовом канале. Это необходимо для анализа полученных результатов и обнаружения взаимосвязей.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для выявления зависимости графиков цветности от изменения температуры и состояния сырья стоит обратить внимание на его кривые охлаждения. На каждой кривой охлаждения (график температуры) шоколада и глазури присутствуют «ступеньки» или нехарактерные колебания, характеризующие переходный процесс из одного фазового состояния в другое. В этот период времени происходит кристаллизация, а температура остаётся постоянной,

пока не застынет весь материал. После этого падение температуры возобновляется.

Следовательно, в области расположенной левее «ступени» на кривой охлаждения, материал находится в жидком состоянии, а в области, расположенной правее — в твёрдом (Рисунок 3). Таким образом, задача визуального контроля, заключающаяся в определении агрегатного состояния материала, может быть сведена к определению точки начала процесса кристаллизации.

Визуальный анализ графиков изменения цветности показывает, что во всех экспериментах присутствуют аномальные участки, на которых кривые резко меняют свой тренд или скорость нарастания. Сини-

ми вертикальными линиями обозначены фактические периоды начала и окончания отверждения сырья, наблюдаемые оператором в ходе проведения эксперимента.

На примере графиков охлаждения шоколадной глазури (Рисунки 3, 4, 5) и шоколада (Рисунок 6) отчётливо видно совпадение длительности и времени нахождения сырья в переходном процессе с изменениями на графиках цветности.

Критические температурные точки начала кристаллизации практически совпадают с критическими точками изменения цветности и характеризуют переходный процесс кристаллизации. Стоит отметить, что присутствует явное отставание (запаздывание) графика температуры от графика цветности по времени. Это связано с тем, что кристаллизация на поверхности сырья начинается раньше из-за наличия теплоотвода в окружающую среду (воздух) и только потом кристаллизуется внутри. Так как камера фиксирует состояние поверхности, а датчик, контролирующий температуру расположен в толще материала, возникает небольшой сдвиг по времени между кривыми.

В процессе 3D печати необходимо контролировать состояние поверхности нанесённого слоя, а его суммарная толщина составляет порядка 0.2–0.4 мм, что в десятки раз меньше, толщины слоя, используемого в эксперименте, поэтому временной задержкой, полученной в эксперименте, можно пренебречь.

Опираясь на обработанный сигнал с WEB камеры, представленный в виде последовательности изменяющихся значений цветности RGB, возможно распознать момент начала процесса кристаллизации на поверхности сырья, путём нахождения аномалий в полученном временном ряду.

Согласно графикам, наибольшее изменение цветности шоколадной глазури и шоколада наблюдается при освещении с цветовой температурой 3000K. Кривые изменения цветности имеют наибольшую амплитуду на первом графике для шоколадной глазури (Рисунок 3) и на четвёртом графике для шоколада (Рисунок 6). Наиболее информативным оказался цветовой канал «В», так как имеет наибольшую амплитуду изменения во всех экспериментах как для глазури, так и для шоколада.

Эффективность подхода определения признаков и свойств сырья при помощи цветных изображений также отмечена в исследовании Oliveira et al. (2021), обосновавшими возможность предсказания степень ферментации какао-бобов при помощи анализа цифровых изображений в RGB цветовом пространстве и оценки их цветности. Авторы рассматривают этот метод, как более дешёвую альтернативу гиперспектральной визуализации, рассматриваемой ранее Cruz-Tirado et al. (2020). Lopes et al. (2022) провели визуальную оценку какао бобов в HSV цветовом пространстве, заявив, что особенности оттенка, его насыщенность и интенсивность также являются надёжными параметрами для идентификации какао-бобов, так как динамика процесса сушки постоянна и всегда связана с каждым сортом какао.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты дают основание полагать об эффективности применения СТЗ для оценки состояния и свойств сырья. Гипотеза о том, что агрегатное состояние шоколадной массы влияет на параметры цветности и его оттенок подтвердилось экспериментально. При помощи WEB — камеры были зафиксированы изменения цветности по каналам «R», «G», «B», которые изменялись в зависимости от температуры сырья в течение всего эксперимента.

Визуальный анализ графиков показал, что в каждом из экспериментов существует резкое нехарактерное изменение параметров цветности, совпадающее с началом процесса кристаллизации шоколадной массы. Были определены оптимальные условия для проведения визуальной оценки состояния шоколада. Наиболее информативным, применительно к шоколаду и шоколадной глазури оказался временной ряд «В», так как он имел наибольшую амплитуду изменения для каждого из экспериментов. Самым подходящим для оценки стало тёплое освещение (цветовая температура 3000K), которое также увеличивало амплитуду всех каналов в каждом эксперименте.

Определение текущего агрегатного состояния нанесённой шоколадной массы при помощи СТЗ, во время процесса 3D печати, необходимо для автоматизированного подбора оптимальной скоро-

сти нанесения сырья. Исследование представлено, как один из этапов разработки системы автоматизированного контроля и управления за процессом пищевой 3D печати шоколадных изделий. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку состояния темперированного шоколада, а также мясного и мучного сырья. Это позволит расширить список ингредиентов, используемых в процессе пищевой 3D печати, состояние которых возможно контролировать с применением систем технического зрения.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Эдуард Шибанов: концептуализация, методология, проведение исследования, создание рукописи и её редактирование.

Иван Благовещенский: разработка программного обеспечения, руководство исследованием.

Евгений Назойкин: формальный анализ, визуализация.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Аднодворцев, А.М., Благовещенский, И.Г., Благовещенский, В.Г., Носенко, А.С., Веселов, М.В., & Нгонганг, Р.Д. (2022). Создание интеллектуальных систем принятия решений на базе технологии сверточных нейронных сетей. В *Фабрика будущего* (с. 25–32). ЗАО «Университетская книга».
- Adnodvortsev, A.M., Blagoveshchensky, I.G., Blagoveshchensky, V.G., Nosenko, A.S., Veselov, M.V., & Ngongang, R.D. (2022). Creation of intelligent decision-making systems based on convolutional neural network technology. In *Factory of the Future* (pp. 25–32). ZAO «Universitetskaya kniga.» (In Russ.)
- Благовещенский, И.Г., Благовещенский, В.Г., Савостин, С.Д., & Кучумов, А.В. (2022). Интеллектуальная система мониторинга технологических процессов производства продуктов на пищевых предприятиях. В *Информатизация и автоматизация в пищевой промышленности* (с. 119–126). ЗАО «Университетская книга».
- Blagoveshchensky, I.G., Blagoveshchensky, V.G., Savostin, S.D., & Kuchumov, A.V. (2022). Intelligent monitoring system for technological processes of food production at food enterprises. In *Informatization and Automation in the Food Industry* (pp. 119–126). ZAO «Universitetskaya kniga.» (In Russ.)
- Благовещенский, И.Г., Благовещенский, В.Г., Головин, В.В., & Аднодворцев, А.М. (2022). Интеллектуальная оптимизация производства на основе использования инновационных продуктов и технологий. В *Информатизация и автоматизация в пищевой промышленности* (с. 140–144). ЗАО «Университетская книга».
- Blagoveshchensky, I.G., Blagoveshchensky, V.G., Golovin, V.V., & Adnodvortsev, A.M. (2022). Intellectual optimization of production based on the use of innovative products and technologies. In *Informatization and Automation in the Food Industry* (pp. 140–144). ZAO «Universitetskaya kniga.» (In Russ.)
- Благовещенский, И.Г., Благовещенский, В.Г., Шибанов, Э.Д., & Загородников, К.А. (2020). Оптимизация 3D печати на примере использования шоколадной глазури. *Пищевая промышленность*, (12), 70–73. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10147>
- Blagoveshchensky, I.G., Blagoveshchensky, V.G., Shibano, E.D., & Zagorodnikov, K.A. (2020). Optimization of 3D printing using chocolate glaze as an example. *Food Industry*, (12), 70–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10147>
- Благовещенский, И. Г., Носенко, С. М., & Носенко, А. С. (2015). Экспертная интеллектуальная система мониторинга процесса формирования помадных конфет с использованием системы технического зрения. *Пищевая Промышленность*, (6), 26–30.
- Blagoveshchensky, I.G., Nosenko, S.M., & Nosenko, A.S. (2015). Expert intelligent monitoring system for the process of forming fondant candies using a technical vision system. *Food Industry*, (6), 26–30. (In Russ.)
- Мартеха, А. Н., & Андреев, В.Н. (2021). Оптимизация 3D-печати шоколадной массы путем корреляции реологических свойств с 3D-моделированием структуры. В *Наука, технологии, кадры — основы достижений прорывных результатов в АПК* (с. 571–578). Татарский институт переподготовки кадров агробизнеса.
- Martekha, A.N., & Andreev, V.N. (2021). Optimization of 3D printing of chocolate mass by correlating rheological properties with 3D modeling of the structure. In *Science, Technologies, Personnel — the Basis for Achieving Breakthrough Results in the Agricultural Sector* (pp. 571–578). Tatar Institute for the Retraining of Agribusiness Personnel. (In Russ.)
- Петряков, А.Н., Благовещенская, М.М., Благовещенский, В.Г., & Крылова, Л.А. (2018). Применение методов объектно-ориентированного программирования для контроля показателей качества кондитерской продукции. *Кондитерское и хлебопекарное производство*, 176 (5–6), 21–23.
- Petryakov, A.N., Blagoveshchenskaya, M.M., Blagoveshchensky, V.G., & Krylova, L.A. (2018). Application of object-oriented programming methods for quality control of confectionery products. *Confectionery and Bakery Production*, 176 (5–6), 21–23. (In Russ.)

- Ребус, Н.А., & Благовещенский, И.Г. (2022). Проблемы внедрения интеллектуальных систем на предприятии. В *Фабрика будущего* (с. 271–277). ЗАО «Университетская книга».
- Rebus, N.A., & Blagoveshchensky, I.G. (2022). Problems of implementing intelligent systems in the enterprise. In *Factory of the Future* (pp. 271–277). ZAO «Universitetskaya kniga.» (In Russ.)
- Семенов, А. С., Максимов А.С., Бесфамильная Е.М., & Талмазова Д.В. (2021). Технологии 3D-печати в пищевой промышленности. *Молодой ученый*, 21(363), 41–43.
- Semenov, A. S., Maksimov, A.S., Besfamilnaya, E.M., & Talmazova, D.V. (2021). 3D printing technologies in the food industry. *Young Scientist*, 21(363), 41–43. (In Russ.)
- Скоморохова, А. И., Родионов, Ю. В., Безбородова, М. В., & Данилин, С. И. (2021). Производство сувенирного шоколада с применением аддитивных технологий. В *Развитие сервисной деятельности в условиях цифровизации экономики* (с. 164–166). НГИЭУ.
- Skomorokhova, A. I., Rodionov, Yu. V., Bezborodova, M. V., & Danilin, S. I. (2021). Production of souvenir chocolate using additive technologies. In *Development of Service Activities in the Context of the Digitalization of the Economy* (pp. 164–166). NGIEU. (In Russ.)
- Agarwal, T., Costantini, & M., Maiti, T. K. (2021). Extrusion 3D printing with pectin-based ink formulations: recent trends in tissue engineering and food manufacturing. *Biomedical Engineering Advances*, 2, 100018. <https://doi.org/10.1016/j.bea.2021.100018>
- Chachlioutaki, K., Karavasili, C., Mavrokefalou, E.E., Gioumouxouzis, C.I., Ritzoulis, C., & Fatouros, D.G. (2022). Quality control evaluation of paediatric chocolate-based dosage forms: 3d printing vs mold-casting method. *International Journal of Pharmaceutics*, 624, 121991. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2022.121991>
- Cruz-Tirado, J. P., Pierna, J. A. F., Rogez, H., Barbin, D. F., & Baeten, V. (2020). Authentication of cocoa (theobroma cacao) bean hybrids by nir-hyperspectral imaging and chemometrics. *Food Control*, 118, 107445. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107445>
- Eswaran, H., Ponnuswamy, R. D., & Kannapan, R. P. (2023). Perspective approaches of 3D printed stuffs for personalized nutrition: A comprehensive review. *Annals of 3D Printed Medicine*, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2023.100125>
- Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>
- Holzmond, O., & Li, X. (2017). In situ real time defect detection of 3D printed parts. *Additive Manufacturing*, 17, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.003>
- Izdebska, J., & Zołek-Tryznowska, Z. (2016). 3D food printing — Facts and future. *Agro Food Industry Hi Tech*, 27(2), 33–37.
- Karavasili, C., Gkaragkounis, A., Moschakis, T., Ritzoulis, & C., Fatouros, D. G. (2020). Pediatric-friendly chocolate-based dosage forms for the oral administration of both hydrophilic and lipophilic drugs fabricated with extrusion-based 3D printing. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 147, 105291. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2020.105291>
- Lafeber, I., Tichem, J.M., Ouwerkerk, N., van Unen, A.D., van Uitert, J.J.D., Bijleveld-Olierook, H.C.M., Kweekel, D.M., Zaal, W.M., Le Brun, P.P.H., Guchelaar, H.J., & Schimmel, K.J.M. (2021). 3D printed furosemide and sildenafil tablets: Innovative production and quality control. *International Journal of Pharmaceutics*, 603, 120694. <http://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120694>
- Lanaro, M., Desselle, M. R., & Woodruff, M. A. (2019). 3D Printing Chocolate. In *Fundamentals of 3D food printing and applications* (pp. 151–173). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814564-7.00006-7>
- Lanaro, M., Forrestal, D. P., Scheurer, S., Slinger, D. J., Liao, S., Powell, S. K., Woodruff, M. A. (2017). 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *Journal of Food Engineering*, 215, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029>
- Lopes, J. F., da Costa, V. G. T., Barbin, D. F., Cruz-Tirado, L. J. P., Baeten, V., & Barbon Junior, S. (2022). Deep computer vision system for cocoa classification. *Multimedia Tools and Applications*, 81(28), 41059–41077. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13097-3>
- Ma, Y., & Zhang, L. (2022). Formulated food inks for extrusion-based 3D printing of personalized foods: A mini review. *Current opinion in food science*, 44, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.12.012>
- Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F. C., & Bhandari, B. (2017). Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 44, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.012>
- Mohapatra, S., Kar, R. K., Biswal, P. K., & Bindhani, S. (2022). Approaches of 3D printing in current drug delivery. *Sensors International*, 3, 100146. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100146>
- Nuchitprasitchai, S., Roggemann, M., & Pearce, J. (2017). Three hundred and sixty degree real-time monitoring of 3-D printing using computer analysis of two camera views. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 1(1). <https://doi.org/10.3390/jmmp1010002>
- Oliveira, M. M., Cerqueira, B. V., Barbon Jr, S., & Barbin, D. F. (2021). Classification of fermented cocoa beans (cut test) using computer vision. *Journal of Food Composition and Analysis*, 97, 103771. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103771>
- Oral, M. O., Derossi, A., Caporizzi, R., & Severini, C. (2021). Analyzing the most promising innovations in food printing. Programmable food texture and 4D foods. *Future Foods*, 4, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100093>
- Outrequin, T. C. R., Gamonpilas, C., Siriawatwechakul, W., & Sreearunothai, P. (2022). Extrusion-based 3d printing of food biopolymers: A highlight on the important rheological parameters to reach printability. *Journal of Food Engineering*, 342, 111371. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111371>

- Rando, P., & Ramaioli, M. (2021). Food 3D printing: Effect of heat transfer on print stability of chocolate. *Journal of Food Engineering*, 294, 110415. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110415>
- Soni, R., Ponappa, K., & Tandon, P. (2022). A review on customized food fabrication process using food layered manufacturing. *LWT*, 161, 113411. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113411>
- Straub, J. (2015). Initial work on the characterization of additive manufacturing (3D printing) using software image analysis. *Machines*, 3(2), 55–71. <https://doi.org/10.3390/machines3020055>
- Tamir, T. S., Xiong, G., Shen, Z., Leng, J., Fang, Q., Yang, Y., Jiang J., Lodhi E., & Wang, F. Y. (2023). 3D printing in materials manufacturing industry: A realm of industry 4.0. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19689>
- You, S., Huang, Q., & Lu, X. (2023). Development of fat-reduced 3d printed chocolate by substituting cocoa butter with water-in-oil emulsions. *Food Hydrocolloids*, 135, 108114. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108114>
- Zhu, S., Wang, W., Stieger, M., van der Goot, A. J., & Schutyser, M. A. (2022). Shear-induced structuring of phase-separated sodium caseinate-sodium alginate blends using extrusion-based 3d printing: Creation of anisotropic aligned micron-size fibrous structures and macroscale filament bundles. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 81, 103146. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103146>