

Разработка методики автоматизированного контроля блеска шоколадных плиток на основе машинного зрения для автоматизации процессов охлаждения и формования

В.Г. Благовещенский, С.Н. Хоменко, А.И. Коновалов

МИРЭА - Российский технологический университет, Москва

Аннотация: В статье представлена методика автоматизированного контроля блеска шоколадных плиток на основе машинного зрения, интегрированная в функциональную схему автоматизации процессов охлаждения и формования. Рассмотрены ключевые факторы, влияющие на блеск, проанализированы существующие методы контроля и обоснована необходимость непрерывной объективной оценки качества. Для оптимизации процесса создан цифровая симуляция в среде R-PRO, позволяющий моделировать различные технологические режимы. Разработанные алгоритмы обработки изображений вычисляют количественные показатели блеска и формируют обратную связь с системой управления, корректируя ключевые параметры производства. Предлагаемый подход повышает точность контроля, снижает объём брака и сокращает время на отладку оборудования, создавая условия для дальнейшего развития полной автоматизации в шоколадной.

Ключевые слова: шоколад, блеск поверхности, автоматизация, машинное зрение, контроль качества, охлаждение и формование, цифровая симуляция.

Введение

Внешний вид шоколада, включая его блеск и однородность поверхности, играет важную роль в формировании потребительского восприятия качества и привлекательности продукта. Когда потребитель видит ровную, гляцевую плитку, у него ассоциируется такое изделие с высокой степенью свежести, правильным составом и хорошими вкусовыми свойствами. В глазах покупателей блестящая поверхность говорит о надлежащем производственном процессе и соблюдении всех необходимых норм, тогда как матовый налёт или неравномерный блеск часто воспринимаются как свидетельство неправильного хранения или недостаточно высокого качества шоколада [1-3].

С точки зрения технологий, шоколадная плитка проходит несколько основных стадий производства: смешение ингредиентов (какао-масла, тёртого

какао, сахара, молочных компонентов), рафинирование для уменьшения размеров частиц, длительная коншировка для улучшения вкусовых характеристик, темперирование (охлаждение и нагревание в определённом температурном диапазоне) и, наконец, формование и окончательное охлаждение. Самым критичным с точки зрения формирования блеска считается этап темперирования, во время которого в какао-масле должны образоваться стабильные кристаллические структуры (обычно называют форму β -кристаллов). Если температурный режим сбивается, процесс кристаллизации нарушается, что может привести к появлению сероватого «жирового поседения» или к неравномерному распределению кристаллов, в результате чего поверхность получается матовой или с пятнами. Помимо температуры, большое влияние оказывают влажность и чистота форм: даже небольшие остатки предыдущих партий шоколада, капель воды или конденсат могут вызвать дефекты на внешней стороне плитки [4]. Также важен правильный подбор и состояние форм: если их поверхность повреждена, поцарапана или загрязнена, то достичь зеркального блеска будет сложнее. Ещё один фактор риска — ошибка в настройках времени охлаждения или скорости прохождения ленты конвейера: из-за слишком быстрого охлаждения кристаллы какао-масла могут не успеть сформироваться в правильной форме, а при слишком медленном процессе повышается вероятность попадания влаги или контакта с тёплым воздухом, что также портит блеск. Из этого можно сделать вывод, о том, чтобы получить ровную, однородно блестящую плитку, на протяжении всех стадий производства необходимо контролировать и поддерживать стабильные параметры температуры и влажности, следить за чистотой форм и оборудования, а также своевременно выявлять любые отклонения от технологических норм [5].

Целью данной работы является разработка методики автоматизированного контроля блеска шоколадных плиток на основе машинного зрения с использованием цифровой симуляции для оптимизации процессов охлаждения и формования.

Анализ научной и технической литературы по проблеме автоматизации контроля блеска поверхностного слоя шоколада показывает, что интерес к данной теме неуклонно растёт в связи с ужесточающимися требованиями к качеству пищевых продуктов и стремлением производителей повысить конкурентоспособность своей продукции. Традиционно оценка блеска осуществлялась преимущественно визуальным методом или с использованием лабораторных приборов (глоссметров), однако эти подходы имеют ряд ограничений. Визуальная оценка субъективна и зависит от опыта оператора, а приборы лабораторного типа не всегда подходят для встраивания непосредственно в производственную линию и требуют специальных условий измерений (определённой геометрии освещения и наблюдения, стабильного температурно-влажностного фона и пр.). Кроме того, данные методы не всегда обеспечивают возможность непрерывного контроля в реальном времени, что существенно затрудняет оперативное реагирование на технологические отклонения.

В последние годы в мировой практике всё чаще рассматриваются и внедряются решения, основанные на технологиях машинного зрения. Исследователи и производственные компании отмечают, что системы компьютерного анализа изображений позволяют не только обнаруживать дефекты формы, цвета или габаритов, но и проводить количественную оценку поверхностных свойств, включая блеск. Применение промышленных видеокамер и специального программного обеспечения в составе конвейерных линий даёт возможность контролировать готовые шоколадные плитки с

высокой скоростью, а современные алгоритмы могут автоматически отличать незначительные отражения света от настоящих дефектов или зон с недостаточным блеском. Однако, как указывают ряд авторов, прямое применение классических методов компьютерного зрения (например, алгоритмов, рассчитанных на высококонтрастные чёрно-белые объекты) может быть затруднено спецификой шоколада: низкой контрастностью изображения, глянцевым бликом, который может искажать регистрируемые камерой параметры яркости [6-8].

Вопросу автоматизации контроля именно блеска уделяется сравнительно меньше внимания, чем выявлению дефектов геометрии и посторонних включений. В имеющихся работах, посвящённых данной теме, обычно рассматриваются подходы к формированию эталонных характеристик отражения света. К примеру, некоторые исследования предлагают использовать методы фотометрической стереозасветки, позволяющие оценивать блеск путём регистрации интенсивности отражённого света под разными углами. Другие авторы экспериментируют с комбинированной подсветкой (диффузной и направленной), что даёт возможность выделить определённые участки поверхности и оценить равномерность блеска. Однако стандартные решения, представленные на рынке систем машинного зрения, зачастую не учитывают специфические физико-химические особенности шоколадной массы и её склонность к быстрому изменению свойств при колебаниях температуры и влажности [9].

Кроме того, исследования показывают, что формирование блеска во многом зависит от параметров темперирования и охлаждения. В ряде статей подчёркивается важность точного соблюдения температурных режимов на всех стадиях: от приготовления шоколадной массы до извлечения готовой плитки из формы. При этом автоматизация самих процессов охлаждения и

формования сосредоточена на контроле температуры и времени пребывания в соответствующих зонах, но редко включает в себя обратную связь на основе фактического состояния готовой поверхности. Таким образом, наблюдается разрыв между системами, отслеживающими технологические параметры (температура, скорость прохождения по конвейеру, влажность), и средствами контроля готового изделия. Это затрудняет своевременную коррекцию режима охлаждения при получении плитки с недостаточным блеском.

Разработка методики автоматизированного контроля блеска плиточного шоколада

Предложен математический расчёт блеска поверхности шоколадных плиток, осуществляемый средствами машинного зрения, основывается на количественном анализе интенсивности отражённого света, регистрируемого камерой. Первым шагом является выделение области интереса (ROI), соответствующей самой плитке без фона или других объектов. Для каждого пикселя (i, j) внутри ROI фиксируется яркость $I(i, j)$, измеряемая в цифровых значениях (к примеру, от 0 до 255 в 8-битном режиме), после чего вычисляется средняя яркость:

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{(i,j) \in ROI} I(i, j)$$

N — число пикселей в ROI. Полученная величина \bar{I} отражает общий уровень блеска, а для оценки однородности поверхности дополнительно используют стандартное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{(i,j) \in ROI} (I(i, j) - \bar{I})^2}$$

Чем меньше σ , тем более гладкой выглядит поверхность. При необходимости анализировать «зеркальный» компонент отражения

применяются специальные пороговые методы, например вычисление отношения средней яркости пиковых участков к общей средней интенсивности. Такие количественные показатели блеска становятся основой для дальнейшего принятия решений системой управления и непосредственно встраиваются в функциональную схему автоматизации, обеспечивая непрерывный мониторинг качества в режиме реального времени.

Разработка методики автоматизированного контроля блеска шоколадных плиток на основе машинного зрения предполагает комплексный подход, сочетающий создание технологически обоснованной схемы получения изображений и использование алгоритмов обработки данных с последующей интерпретацией результатов. На этапе внедрения методики автоматизированного контроля блеска шоколадных плиток необходимо разработать функциональную схему автоматизации (ФСА), где основные стадии технологического процесса, будет связана единой системой управления и мониторинга.

На втором этапе определяется модель процесса образования блеска, учитывающая температурный режим, скорость охлаждения, влажность и свойства формы, в которую заливается шоколадная масса. Для получения объективных цифровых данных разрабатывается система машинного зрения, включающая выбор подходящей камеры (с учётом её спектрального диапазона и разрешения), оптимальное расположение источников освещения (обычно комбинирующих рассеянный и направленный свет) и формирование эталонного набора изображений для калибровки. Далее создаётся программный модуль, отвечающий за анализ изображений: он выделяет зоны поверхности шоколадной плитки, оценивает уровень отражённого света и вычисляет количественные показатели блеска (яркостные гистограммы, среднюю и максимальную интенсивность, коэффициенты вариации и т.д.).

Важным элементом является цифровая симуляция, которая даёт возможность воспроизводить различные сценарии формирования блеска и выявлять потенциальные дефекты уже на стадии виртуальных экспериментов. В симуляционной среде моделируются условия реальной производственной линии: меняются температура, время пребывания в охлаждающих камерах, скорость прохождения форм по конвейеру, и система машинного зрения «наблюдает» за виртуальными образцами плиток. Это позволяет оптимизировать конфигурацию оборудования, уточнить алгоритмы обработки изображений и сформировать базу данных возможных отклонений. Итогом является замкнутый контур управления, когда показатели блеска (выделенные системой машинного зрения) напрямую влияют на корректировку параметров охлаждения и формования, тем самым обеспечивая стабильное качество готового продукта.

Для более точной настройки параметров и проверки работоспособности предложенной методики на разных этапах охлаждения и формования шоколада целесообразно использовать цифровую симуляцию производственной линии. Они позволяют заранее моделировать возможные отклонения и корректировать алгоритмы машинного зрения без риска получить брак в реальном производстве. Именно такой подход обеспечивает непрерывную оптимизацию процессов и более гибкое управление качеством, учитывая сложные физико-химические свойства шоколадной массы [10, 11].

Была переработана существующая ФСА, в которой была произведена интеграция камеры для расширения возможностей контроля и мониторинга технологического процесса. Данная ФСА включает в себя стандартные элементы управления и сигнализации, среди которых прибор, обозначенный «АЕ 16-1», представленный на рисунке 1.

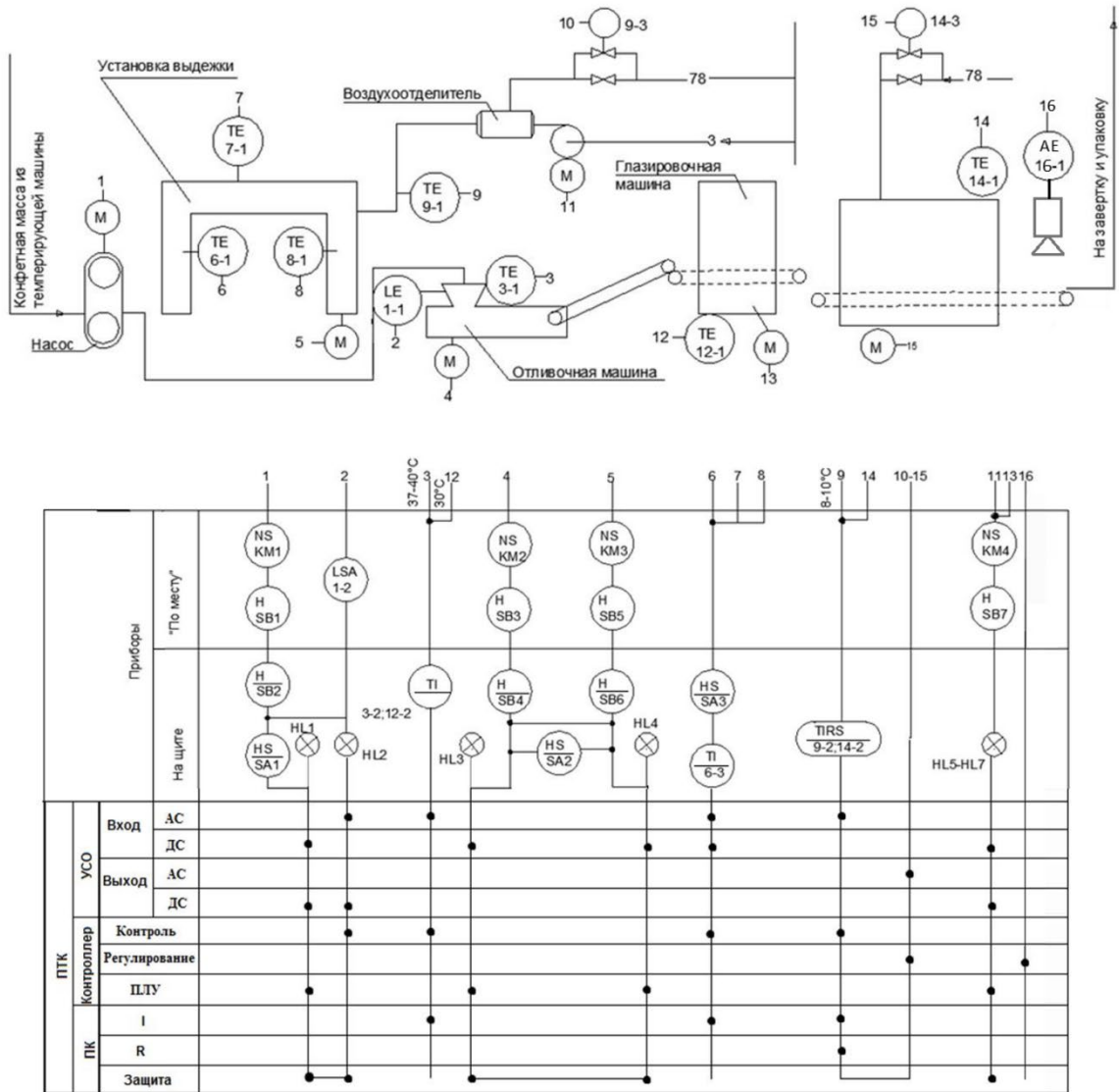


Рис. 1. Функциональная схема автоматизации процесса производства шоколада

Цифровая симуляция, созданная с помощью программы R-PRO, представляет собой виртуальную копию реального производственного процесса, в которой воспроизводятся основные параметры и динамика охлаждения и формования шоколадных плиток. Благодаря встроенным инструментам моделирования и визуализации, R-PRO позволяет не только задать физические и технологические характеристики (скорость конвейера,

температурные режимы, геометрию форм), но и проводить серию «виртуальных экспериментов». На этой стадии можно оперативно тестировать различные сценарии — от изменения времени выдержки в холодильном туннеле до корректировки угла наклона форм — и отслеживать, как подобные корректировки влияют на качество формируемой поверхности плитки. Важно, что программная среда поддерживает импорт и экспорт данных, позволяя интегрировать результаты моделирования с алгоритмами машинного зрения, тем самым формируя обратную связь между виртуальным процессом и системой контроля блеска. На рисунке 2 представлена цифровая симуляция технологического процесса производства шоколада.

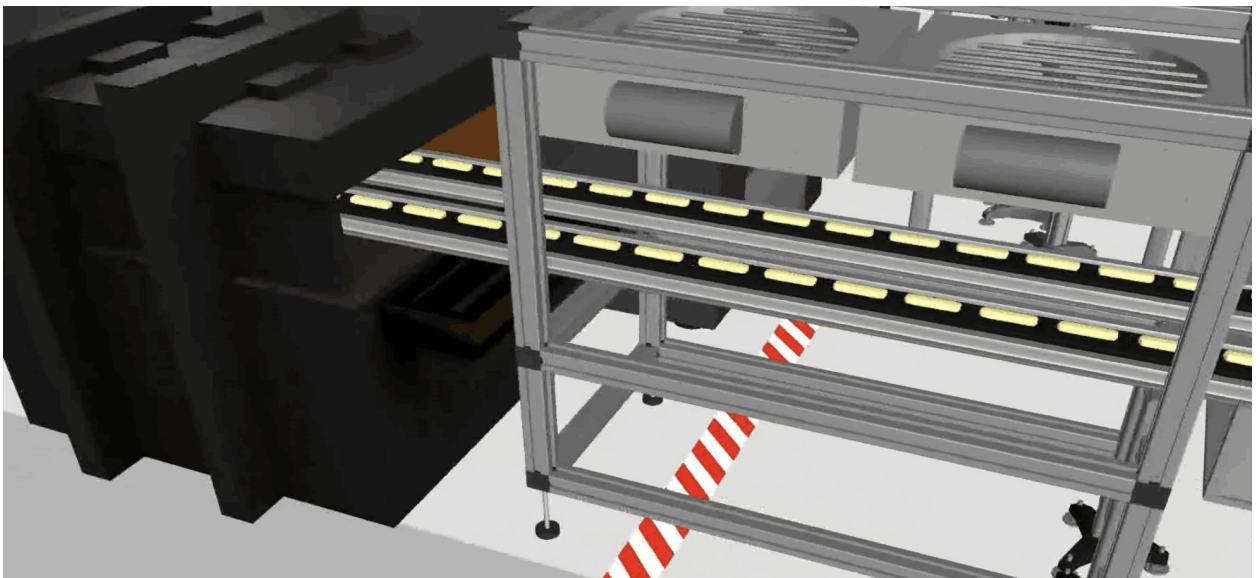


Рис. 2 – Цифровая симуляция технологического процесса производства шоколада

Применение цифровой симуляции в R-PRO даёт существенные преимущества по сравнению с традиционными методами исследований и отладки оборудования непосредственно на производственной линии. Оно позволяет сэкономить ресурсы, сократить время на физические эксперименты и минимизировать риск брака при тестировании новых настроек. Кроме того, собранные в ходе моделирования данные служат основой для последующих

этапов оптимизации: на их базе можно выделять ключевые технологические параметры, влияющие на блеск, оценивать чувствительность процесса к колебаниям температуры или влажности и принимать более обоснованные решения при модернизации производства.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на производственной линии, специально адаптированной для оценки параметров блеска шоколадных плиток в режиме реального времени. Линия включала в себя стандартный цикл приготовления, темперирования и формования шоколадной массы, после чего плитки поступали в холодильный туннель, поддерживающий температурный диапазон от +8 до +12 °С в зависимости от заданного режима. Скорость движения конвейера в ходе эксперимента была зафиксирована на уровне 2 м/мин, что, с одной стороны, соответствовало реальным производственным условиям, а с другой — давало достаточно времени для корректной съёмки и последующего анализа поверхности шоколадных плиток.

Для оценки репрезентативности результатов было отобрано в общей сложности 1000 образцов, полученных из трёх разных партий шоколада, различающихся по составу и типу используемого какао-масла. Съёмка каждого образца производилась в зоне выхода из холодильного туннеля, где камера машинного зрения была установлена под углом 45° к поверхности плиты с использованием комбинированного (направленного и рассеянного) освещения. Перед началом эксперимента выполнялась калибровка камеры с помощью эталонных мишеней, обеспечивающих корректировку по яркости и цвету. Каждая шоколадная плитка фотографировалась не менее трёх раз, чтобы снизить влияние случайных факторов (вибраций конвейера, колебаний освещения и т.д.).

В ходе эксперимента оценивались как количественные параметры блеска (средняя яркость, максимальная интенсивность отражения, коэффициент вариации яркостных значений), так и степень выраженности дефектов поверхности (наличие матовых пятен, трещин, подтёков). Для анализа блеска применялась система машинного зрения, результат работы которой представлен на рисунке 3, где показано, как эта система определила распределение яркости. Дополнительно фиксировался процент площади, покрытой дефектами, если они возникали. Полученные данные сопоставлялись с технологическими показателями (температура в туннеле, влажность, время пребывания в формовочных камерах), что позволяло выявить причинно-следственные связи и, при необходимости, оперативно скорректировать параметры производственного процесса. Полученные результаты позволили не только оптимизировать технологический процесс, но и выявить ключевые факторы, влияющие на качество конечного продукта.



Рис. 3. Результат системы машинного зрения

Заключение

В ходе исследования была разработана методика автоматизированного контроля блеска шоколадных плиток на основе машинного зрения, интегрированная в функциональную схему автоматизации (ФСА) производственного процесса. Анализ литературы показал, что существующие методы оценки блеска либо слишком субъективны, либо затруднительны для непрерывного применения на производственных линиях. Предложенное решение, включающее выбор оптимальных параметров освещения, использование специализированных алгоритмов обработки изображений и интеграцию камеры в общую систему управления, обеспечивает объективный контроль поверхности шоколадных плиток в режиме реального времени и позволяет оперативно корректировать технологические параметры охлаждения и формования.

Дополнительно создан цифровая симуляция в среде R-PRO, который даёт возможность виртуально моделировать различные сценарии и выявлять оптимальные условия для сохранения требуемого уровня блеска. Этот инструмент позволяет заранее протестировать работу системы машинного зрения и механизмов управления, минимизируя риск брака и повышая эффективность последующего внедрения на реальном производстве. В результате разработанная методика обеспечивает надёжный и экономически эффективный контроль качества, а в перспективе — основу для дальнейшего развития адаптивной автоматизации в шоколадной промышленности.

Литература

1. Шарисламова В.Ф., Сүй М. Особенности технологии приготовления шоколада // Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее: Сборник научных статей 6-й Всероссийской научной конференции. В 3-х томах, Курск, 19–20 октября 2023 года / Редколлегия: А.А. Горохов (отв.

редактор). Том 3. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2023. – С. 74-77. – EDN НВТТНҚ.

2. Веретенников Н. Ю. Влияние темперирования шоколада на его технологические качества // Кузбасс: образование, наука, инновации. Молодежный вклад в развитие научно-образовательного центра "Кузбасс": Материалы X Инновационного конвента, Кемерово, 30 января 2022 года. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. – С. 124-127. – EDN TRKARS.

3. Благовещенская М.М., Аднодворцев А.М. Автоматизированная система расчета и контроля соотношения входящего сырья и готовой продукции в кондитерском производстве (на примере линии по производству шоколада) // Health, Food & Biotechnology. – 2021. – Т. 3. – №. 1. – С. 63-74. – DOI: 10.36107/hfb.2021.i1.s98. – EDN CBVWYZ. URL: hfb-mgupp.com/jour/article/view/98.

4. Борисова А.В., Кудусова Ю.С. Алгоритм подбора машины для темперирования шоколада в шоколадный цех кафе-кондитерской // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. – 2019. – №. 21. – С. 167-170.

5. Своеволина Г.В. Анализ органолептических показателей шоколада функционального назначения // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2020. – №. 9. – С. 178-180.

6. Шибанов Э., Благовещенский И.Г., Назойкин Е.А. Визуальная оценка состояния шоколадной массы при помощи системы технического зрения // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2023. – №. 4. – С. 114-124. URL: spf-mgupp.ru/jour/article/view/420.

7. Бурцев А.П. Машинное зрение и его применение в различных отраслях // Молодежь и наука: шаг к успеху: Сборник научных статей 6-й Всероссийской

научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 3-х томах, Курск, 22–23 марта 2022 года / Отв. редактор М.С. Разумов. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 248-251. – EDN WSSZEC.

8. Кучумов А.В. Кучумов А.В., Благовещенский И.Г., Благовещенский В.Г., Семенов А.С., Талмазова Д.В. Использование компьютерного зрения для контроля в потоке формы готовой карамели // Роговские чтения: сборник докладов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 16 декабря 2022 года. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2023. – С. 270-279. – EDN FJNKHQ.

9. Чулкова К.В. Влияние процесса темперирования на качество шоколада // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей X Международной научно-практической конференции: в 2 ч., Пенза, 05 декабря 2019 года. Том Часть 1. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 152-154. – EDN YOELSD.

10. Родникова Л.Ф., Китаевская С.В. Применение инновационных технологий в производстве кондитерских изделий нового поколения //Пищевые технологии и биотехнологии. – 2023. – С. 805-808. URL: elibrary.ru/download/elibrary_54062165_35632150.pdf#page=805.

11. Благовещенский В.Г., Благовещенский И.Г., Холопов Е.Н., Рогов С.Д., Веселов М.В. Автоматизация технологических процессов за счет внедрения цифрового двойника //Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности. – 2023. – С. 72-77.

References

1. Sharislamova V.F., Syuj M. Problemy` i perspektivy` razvitiya Rossii: Molodezhny`j vzglyad v budushhee: Sbornik nauchny`x statej 6-j Vserossijskoj nauchnoj konferencii. V 3-x tomax, Kursk, 19–20 oktyabrya 2023 goda Redkollegiya: A.A. Goroxov (otv. redaktor). Tom 3. Kursk: Zakry`toe akcionerное obshhestvo "Universitetskaya kniga", 2023. pp. 74-77.
2. Veretennikov N. Yu. Kuzbass: obrazovanie, nauka, innovacii. Molodezhny`j vklad v razvitie nauchno-obrazovatel`nogo centra "Kuzbass": Materialy` X Innovacionnogo konventa, Kemerovo, 30 yanvarya 2022 goda. Kemerovo: Kemerovskij gosudarstvenny`j universitet, 2022. pp. 124-127. EDN TRKARS.
3. Blagoveshhenskaya M.M., Adnodvorcev A.M. Health, Food & Biotechnology. 2021. T. 3. №. 1. pp. 63-74. DOI: 10.36107/hfb.2021.i1.s98. – EDN CBVWYZ. URL: hfb-mgupp.com/jour/article/view/98.
4. Borisova A.V., Kudusova Yu.S. Aktual`ny`e voprosy` sovershenstvovaniya texnologii proizvodstva i pererabotki produkcii sel`skogo xozyajstva. 2019. №. 21. pp. 167-170.
5. Svoevolina G.V. Vestnik Luganskogo nacional`nogo universiteta imeni Vladimira Dalya. 2020. №. 9. pp. 178-180.
6. Shibanov E`, Blagoveshhenskij I.G., Nazojkin E.A. Xranenie i pererabotka sel`xozsy`r`ya. 2023. №. 4. pp. 114-124. URL: spfp-mgupp.ru/jour/article/view/420.
7. Burcev A.P. Sbornik nauchny`x statej 6-j Vserossijskoj nauchnoj konferencii perspektivny`x razrabotok molody`x ucheny`x. V 3-x tomax, Kursk, 22–23 marta 2022 goda. Otv. redaktor M.S. Razumov. Tom 3. Kursk: Yugo-Zapadny`j gosudarstvenny`j universitet, 2022. pp. 248-251. EDN WSSZEC.

8. Kuchumov A.V. Kuchumov A.V., Blagoveshhenskij I.G., Blagoveshhenskij V.G., Semenov A.S., Talmazova D.V. Rogovskie chteniya: sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodny`m uchastiem, Moskva, 16 dekabrya 2022 goda. Kursk: Zakry`toe akcionernoe obshhestvo "Universitetskaya kniga", 2023. pp. 270-279. EDN FJNKHQ.

9. Chulkova K.V. Sovremennaya nauka: aktual`ny`e voprosy`, dostizheniya i innovacii: sbornik statej X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 2 ch., Penza, 05 dekabrya 2019 goda. Tom Chast` 1. Penza: "Nauka i Prosveshhenie" (IP Gulyaev G.Yu.), 2019. – pp. 152-154. EDN YOELSD.

Rodnikova L.F., Kitaevskaya S.V. Pishhevy`e texnologii i biotexnologii. 2023. – pp. 805-808. URL: elibrary.ru/download/elibrary_54062165_35632150.pdf#page=805.

11. Blagoveshhenskij V.G., Blagoveshhenskij I.G., Xolopov E.N., Rogov S.D., Veselov M.V. Fabrika budushhego: perexod k peredovy`m cifrovym, intellektual`ny`m proizvodstvenny`m texnologiyam, robotizirovanny`m sistemam dlya otraslej pishhevoj promy`shlennosti. 2023. pp. 72-77.

Дата поступления: 14.02.2025

Дата публикации: 26.03.2025