

Подход к автоматизации и цифровому контролю содержания ферропримесей в пищевых ингредиентах

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

М. Н. Полисмакова, А. А. Сандуляк, Н. В. Соловьев, Д. А. Сандуляк, А. В. Сандуляк, В. А. Ершова

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Анна Александровна Сандуляк
E-mail: sandulyak_a@mirea.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Сандуляк, А. А., Полисмакова, М. Н., Соловьев, Н. В., Сандуляк, Д. А., Сандуляк, А. В., & Ершова, В. А. (2024). Подход к автоматизации и цифровому контролю содержания ферропримесей в пищевых ингредиентах. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(3), 133-143. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.3.592>

ПОСТУПИЛА: 20.03.2024

ДОРАБОТАНА: 05.09.2024

ПРИНЯТА: 15.09.2024

ОПУБЛИКОВАНА: 30.09.2024

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания в сфере науки (проект FSFZ-2024-0005).



АННОТАЦИЯ

Введение: Одним из показателей качества муки, круп, сахара и многих других пищевых сред является содержание в них ферропримесей. Существующие методы соответствующего контроля (в том числе приведенные во многочисленных ГОСТах) как правило, заключаются в проведении трех операций-циклов магнитного извлечения ферропримесей, их накопления и определения суммарной массы. Однако при проведении ограниченного (даже повышенного) числа таких операций в пробе исследуемого продукта всегда остается некая неизвлеченная, зачастую значительная, масса частиц, что обуславливает значимую погрешность контроля.

Цель: Представить результаты апробации созданного авторами прибора-анализатора – с возможностями автоматизации и цифрового контроля содержания ферропримесей, позволяющий оперативно получать более объективный результат по сравнению с существующими методами контроля.

Материалы и методы: При апробации прибора экспериментально получали массово-операционную зависимость убывания содержания ферропримесей для каждой исследуемой пробы: по мере их магнитного извлечения из продукта, далее находили ее математический вид – для дальнейшей экстраполяции и расчета суммарной массы. В качестве объекта исследования использованы пробы таких пищевых продуктов как мука, солод, чай.

Результаты: Представлен создаваемый лабораторный образец прибора-анализатора и описан принцип его работы, а также результаты его тестирования. Согласно результатам тестирования прибора-анализатора полученные значения по содержанию ферропримесей в исследуемых пробах значительно превышают нормируемые значения, что обязывает принимать соответствующие решения по удалению такого рода примесей из изучаемых продуктов.

Выводы: Созданный прибор-анализатор может иметь широкое применение в пищевой отрасли для оперативного и достоверного контроля ферропримесей в различных пищевых ингредиентах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ферропримеси; контроль ферропримесей в пищевых ингредиентах; операционные массы ферропримесей; прибор-анализатор

An Approach to Automation and Digital Control of Ferroimpurities in Food Ingredients

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Maria N. Polismakova, Anna A. Sandulyak, Nikita V. Soloviev, Darya A. Sandulyak, Alexander V. Sandulyak, Vera A. Ershova

CORRESPONDENCE:

Anna A. Sandulyak

E-mail: sandulyak_a@mirea.ru

FOR CITATIONS:

??????

RECEIVED: 20.03.2024

REVISED: 05.09.2024

ACCEPTED: 15.09.2024

PUBLISHED: 30.09.2024

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSFZ-2024-0005).



ABSTRACT

Introduction: One of the quality indicators of flour, cereals, sugar and many other food products is the content of ferroimpurities. Current methods of appropriate control (including those given in numerous standards), as a rule, encompass three operations of magnetic extraction of ferroimpurities, their accumulation and determination of the total mass. However, with a limited (even increased) number of such operations, a certain unrecovered, often significant, particle mass always remains in the sample of the test product, which leads to an error in the control.

Purpose: To present the approbation results of the analyzer created by the authors with the capabilities of automation and digital control of the content of ferroimpurities content, leading to quickly obtaining a more objective result compared to existing control methods.

Materials and Methods: We experimentally obtained a mass-operational dependence of the decrease in the content of ferroimpurities: as they were magnetically extracted from the product, then we found its mathematical dependence - for further extrapolation and calculation of the total mass. As an object of research, samples of such food products as flour, malt, tea were utilized.

Results: The developed laboratory sample of the analyzer and the principle of its operation and test are described. Considering the results of testing the analyzer, the obtained values for the content of ferroimpurities in the test samples significantly exceed the standardized values, which substantiates appropriate decisions on the removal of such impurities from the studied products.

KEYWORDS

ferroimpurities; control of ferroimpurities in food ingredients; mass-operational dependence; analyzer

ВВЕДЕНИЕ

Анализ информации, связанной с наличием (по объективным и субъективным причинам) ферропримесей в самых разных промышленных (Hu et al., 2024; Koukabi et al., 2012; Macián et al., 2006; Xue et al., 2022), в том числе и пищевых, средах (Глебов и соавт., 2010; Зверев и соавт., 2008, Мурашов и соавт., 2019; Невзоров и соавт., 2012; Носова с соавт., 2023; Масюткин, 2016; Фазуллина и соавт., 2020), исследованием их гранулометрического состава и магнитных свойств (Agarwal et al., 2003; Cuerva et al., 2022; Gao et al., 2012; Goncalves et al., 2024; Jia et al., 2018; Liu et al., 2021; Tandon et al., 2006; Toneguzzo et al., 2006), для последующего эффективного извлечения этих примесей из среды (предпочтительно — посредством высокоградиентной сепарации (Li et al., 2019; Kheshti et al., 2019; Singh et al., 2015; Shin et al., 2004; Tripathy et al., 2017; Wang et al., 2019; Wang et al., 2020; Xue et al., 2020; Xue et al., 2022; Ye et al., 2023) — указывает на масштабность этой проблемы.

Одним из показателей качества пищевых продуктов является нормативное содержание в них разного рода примесей¹ (Глебов и соавт., 2010; Зверев и соавт., 2008; Масюткин, 2016; Мурашов и соавт., 2019; Невзоров и соавт., 2012; Носова и соавт., 2023; Фазуллина и соавт., 2020), в частности ферропримесей (металломагнитных примесей) (Trafialek

et al., 2016). Для их контроля используется метод, предусматривающий многократное магнитное извлечение ферропримесей из слоя пробы этой среды: наиболее часто рекомендуется проводить три (как бы приемлемые по числу) операции-цикла, накапливая извлекаемые ферропримеси и определяя их суммарную массу².

Однако, как установлено и подтверждено на примере многочисленных пищевых продуктов (Сандуляк и соавт., 2011, Сандуляк и соавт., 2010), проведение ограниченного числа таких операций во всех случаях является недостаточным: в исследуемом продукте всегда остается некая неизвлеченная, зачастую значительная, масса частиц, даже при осуществлении повышенного числа n операций-циклов. По мере увеличения n величина этой массы, хотя и асимптотически убывает, приближается к нулю лишь при неограниченном числе операций. Ранее была предложена концепция усовершенствования этого (магнитного) метода определения содержания ферромагнитных частиц-примесей. Ключевое положение концепции — обязательное получение информации об операционных массах выделяемых частиц. Последующее нахождение пооперационной зависимости этих масс, ее математическое описание служат обоснованию экстраполяции такой зависимости и тем самым нахождению суммарной массы частиц: как фактически выделенных, так

¹ Глебов, Л. А., Демский, А. Б., Веденьев, В. Ф., & Яблоков, А. Е. (2010). *Технологическое оборудование и поточные линии предприятий по переработке зерна*. М.: ДеЛи принт

² Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации. (2007). Межгосударственный стандарт. Мука, крупа и отруби. Метод определения металломагнитной примеси (ГОСТ 20239–74). Стандартинформ. Госстандарт России. (2006). Государственный стандарт Российской Федерации. Солод ржаной сухой. Технические условия (ГОСТ Р 52061–2003). Госстандарт России. Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации. (2016). Межгосударственный стандарт. Сахар. Метод определения ферропримесей (ГОСТ 12573–2013). Стандартинформ. Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации. (2003). Межгосударственный стандарт. Концентраты пищевые. Методы определения примесей и зараженности вредителями хлебных запасов (ГОСТ 15113.2–77). Стандартинформ. Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации. (2006). Межгосударственный стандарт. Чай. Правила приемки и методы анализа (ГОСТ 1936–85). Стандартинформ. Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации. (2019). Межгосударственный стандарт. Изделия кондитерские. Методы определения массовой доли золы и металломагнитной примеси (ГОСТ 5901–2014). Стандартинформ. Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации. (2011). Межгосударственный стандарт. Комбикорма. Методы определения металломагнитной примеси (ГОСТ 13496.9–96). Стандартинформ. Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации. (2002). Межгосударственный стандарт. Жмыхи, шроты и горчичный порошок. Метод определения металлопримесей (ГОСТ 13979.5–68). Стандартинформ. Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации. (2002). Межгосударственный стандарт. Мука животного происхождения. Методы испытаний (ГОСТ 17681–82). Стандартинформ. Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации. (2009). Межгосударственный стандарт. Зерно. Методы определения общего и фракционного содержания сорной и зерновой примесей; содержания мелких зерен и крупности; содержания зерен пшеницы, поврежденных клопом-черепашкой; содержания металломагнитной примеси (ГОСТ 30483–97). Стандартинформ. Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации. (2018). Межгосударственный стандарт. Водоросли морские, травы морские и продукты их переработки. Методы анализа (ГОСТ 26185–84). Стандартинформ.

и оставшихся в изучаемой пробе. Разработанный авторами метод определения содержания ферропримесей, включенный в программу национальной стандартизации, введен в действие как ГОСТ Р 55575–2013 «Продукты пищевые сыпучие. Определение содержания ферропримесей опытно-расчетным магнитным методом операционного экстраполируемого выделения». Тем не менее, получение информации о массовом содержании ферропримесей в среде продолжает оставаться трудоемким, что негативно сказывается на качестве анализа пищевых ингредиентов на предприятиях.

Цель данной статьи: представить результаты тестирования прибора-анализатора — с возможностями автоматизации и цифрового контроля содержания ферропримесей, позволяющего получать более объективный результат по сравнению с существующими методами контроля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оборудование

Для определения содержания ферропримесей в пробе сыпучей среды применена авторская разработка — прибор-анализатор (патент № 127016). На Рисунке 1 представлен вид лабораторного образца разработанного прибора. В нем осуществляется магнитное выделение ферромагнитных частиц из сыпучей среды посредством последовательно расположенных идентичных магнитных блоков (зон), с возможностью определения масс частиц, осажденных в каждой из зон магнитного выделения.

Прибор осуществляет контроль содержания ферромагнитных частиц в пробах любых исследуемых сред. Исходное содержание такого рода частиц может быть как сравнительно низким, так и высоким. Прибор должен быть рассчитан на контроль проб с любым содержанием. При этом пользователь прибора (корпус которого выполнен прозрачным) располагает текущей информацией о фактическом накоплении частиц, т.е. в режиме реального времени может наблюдать и оперативно регулировать накопление магнитоактивных частиц в каждой из зон их магнитного выделения.

Рисунок 1

Вид прибора-анализатора полиоперационного (с цифровой обработкой данных) контроля содержания магнитоактивных частиц в сыпучей среде

Figure 1

Appearance of the multi-operational analyzer (with digital data processing) for monitoring the content of magnetically active particles in a bulk medium

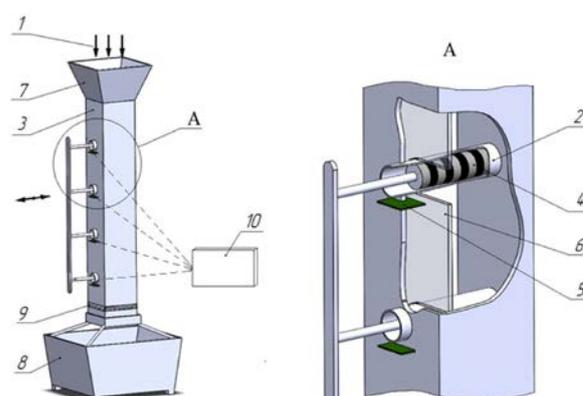


Рисунок 2

Основные элементы прибора-анализатора (четырёхсекционного) контроля содержания магнитоактивных частиц в сыпучей среде

Figure 2

Main components of the analyzer (four-section device) for monitoring the content of magnetically active particles in a bulk medium



Внутреннее устройство прибора-анализатора изображено на Рисунке 2. Выполняются пошаговые операции магнитной сепарации пробы среды 1 посредством находящихся в потоке этой среды четырех источников (блоков) равноценного магнитного воздействия. Каждый из них состоит из неферромагнитного, заглушенного в концевой части, гнезда 2 (здесь трубчатой формы), вмонтированного в вертикальную поверхность рабочего канала 3, и периодически помещаемым в это гнездо магнитным блоком 4 (в частности, системой постоянных магнитов) — одновременно с другими тремя магнитными блоками.

Под каждым из гнезд 2 (Рисунок 2), а именно под его начальным, примыкающим к поверхности рабочего канала 3, участком, где осуществляется самопроизвольный сброс выделенных частиц, осевших на внешней поверхности гнезд 2 и перемещаемых к этому участку при периодическом выведении магнитного блока 4 из гнезда 2, установлены весы 5. Они исполнены с применением тензодатчика (в частности, балочного типа, градуированного в размерностях массы), экранированы от потока сепарируемой пробы среды 1 неферромагнитной защитной перегородкой 6.

Для подачи пробы среды 1 на сепарацию и отвода ее после сепарации (Рисунок 2) служат питательный бункер 7 и приемная емкость 8, при этом расход среды 1 регулируется, например, устройством 9 шиберного типа.

Обработку сигналов, поступающих от всех (четыре) весов 5 с тензодатчиками, выполняет системный блок 10 цифровизации данных. Он обладает функциями визуализации получаемой зависимости операционных, выделяемых из потока среды 1, масс магнитоактивных частиц, осаждающихся с помощью магнитных блоков 4 на внешних поверхностях последовательно расположенных гнезд 2, экстраполяции этой зависимости, интеграции фактических и экстраполяционных данных операционных масс выделяемых частиц.

Процедура проведения эксперимента

При работе прибора-анализатора проба анализируемой среды 1, подаваемая в него через питательный бункер 7, проходит по рабочему каналу

3, где пошагово подвергается операциям сепарации пробы за счет воздействия магнитных блоков 4, помещенных в неферромагнитные гнезда 2. Ферромагнитные частицы, содержащиеся в анализируемой среде 1, под воздействием магнитного поля осаждаются на внешних поверхностях гнезд 2. При этом наблюдается определенное закономерное уменьшение массы осаждаемых ферромагнитных частиц на каждом последующем гнезде 2 по мере прохождения пробы 1 вниз по рабочему каналу 3.

После осуществления магнитной сепарации пробы среды 1 (Рисунок 2) осуществляют вывод магнитных блоков 4 из гнезд 2. При выводе происходит перемещение (вслед за движением магнитных блоков 4) выделенных из пробы 1 (осевших на внешней поверхности гнезд 2) ферромагнитных частиц на участок гнезда 2, примыкающий к поверхности рабочего канала 3. Затем следует их самопроизвольный сброс на весы 5 (с тензодатчиками) — после полного вывода магнитного блока 4 за пределы гнезда 2 и соответственно рабочего канала 3, когда магнитное воздействие на ферромагнитные частицы исчезает. Сигналы от всех четырех тензодатчиков весов 5 поступают на цифровую обработку в соединенный с весами 5 системный блок 10 цифровизации данных. Производится автоматизированная обработка данных, которая заключается в следующем: зафиксированная операционная зависимость масс выделяемых из пробы частиц экстраполируется, производится расчет суммарной массы содержания частиц в пробе, состоящей из фактических и экстраполяционных данных. Данная информация выводится на экран для оператора (патент РФ № 2752578).

Анализ данных

Для реализуемого в приборе-анализаторе усовершенствованного метода магнитного полиоперационного контроля разработана программа ЭВМ. Получаемые данные масс навесок позволяют в автоматизированном режиме устанавливать функциональный вид зависимости убывания операционных масс навесок m . Получаемая зависимость, как правило, экспоненциальная функция типа $m = a \cdot e^{-k \cdot n}$ с опытными параметрами a и k . Будучи дискретной, такая функция представляет собой убывающую геометрическую прогрессию, а это

позволяет определять полную (соответствует неограниченному числу операций) массу магнитоактивных примесей в изучаемой пробе (как фактически выделенных, так и остаточных), используя полученную авторами расчетную формулу:

$$\Sigma m = \frac{a}{e^k - 1}, \quad (1)$$

содержащуюся в том числе в упомянутом выше ГОСТ Р 55575.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В созданном авторами приборе-анализаторе впервые реализован метод контроля пищевых ингредиентов, предусматривающий многократное магнитное извлечение ферропримесей из пробы этой среды, автоматизированное (без участия оператора) получение функциональной зависимости операционных масс ферропримесей, ее экстраполяции с определением суммарной массы ферропримесей, содержащихся в исследуемой пробе.

Работа прибора-анализатора протестирована на пищевых продуктах и ингредиентах. На Рисунке 3 представлены результаты работы разработанной программы в форме *Print Screen*. Вверху слева приводится зависимость убывания операционных масс навесок, вверху справа — та же зависимость после обработки данных в полулогарифмических координатах, свидетельствующая (по факту квазилинеаризации данных в таких координатах) об ее экспоненциальном характере. Снизу справа приводится итоговый результат. Проведение исследования заключалось в пропуске проб пищевых продуктов (мука, солод, чай), содержащих ферропримеси, через прибор-анализатор, работа которого подробно описана выше.

Итоговый результат (масса всех присутствующих в пробе примесей: как за проведенные четыре операции, так и за пределами эксперимента), выданный программой (Рисунок 3, указан справа как « Σm »), полностью согласуется с результатом расчета по формуле (1). Так, данные по весу извлеченных на каждой ступени-операции контроля муки, солода и чая (Рисунок 3, указаны слева) описываются соответствующими экспоненциальными функциями вида $m = a \cdot e^{-k \cdot n}$: $m = 165,9 \cdot e^{-0,98733n}$, $m = 86,12 \cdot e^{-0,60914n}$ и $m = 136,368 \cdot e^{-0,53315n}$. Учитывая

коэффициенты a и k , производится расчет масс по формуле (1).

Согласно результатам тестирования прибора-анализатора содержание ферропримесей в исследуемых пробах таких сред как мука, солод, чай превышает нормируемые значения (3 мг/кг для муки и солода, 5 мг/кг для чая) не менее, чем в 2 раза. А, значит, применение магнитных сепараторов для очистки этих продуктов от ферропримесей должно быть обязательным.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настоящее исследование демонстрирует эффективность предложенного прибора-анализатора в контроле содержания ферропримесей в пищевых ингредиентах, таких как мука, солод и чай. Полученные результаты согласуются с предыдущими выводами о значительных остаточных массах ферропримесей, оставшихся после ограниченного числа операций традиционных методов магнитного выделения (Сандуляк и соавт., 2011, 2010). Данные эксперимента, указывающие на существенное превышение нормируемых значений содержания ферропримесей в исследуемых продуктах, подтверждают необходимость улучшения стандартных методов контроля, что было ранее отмечено в работах Глебова и соавт. (2010) и Фазуллиной и соавт. (2020).

Сравнение с традиционными методами, предусматривающими многократное магнитное извлечение ферропримесей, показало, что новый прибор-анализатор обеспечивает более точное определение суммарного содержания примесей. В отличие от ранее описанных методов, которые требуют значительных усилий оператора и многократных манипуляций для достижения высокой степени чистоты, представленный метод позволяет автоматически фиксировать массу частиц на каждой стадии магнитного выделения. Данный подход, согласно ранее предложенной теоретической модели (ГОСТ Р 55575–2013), реализует расчет полной массы ферропримесей, включая остаточную, что соответствует концепции операционного экстраполируемого выделения.

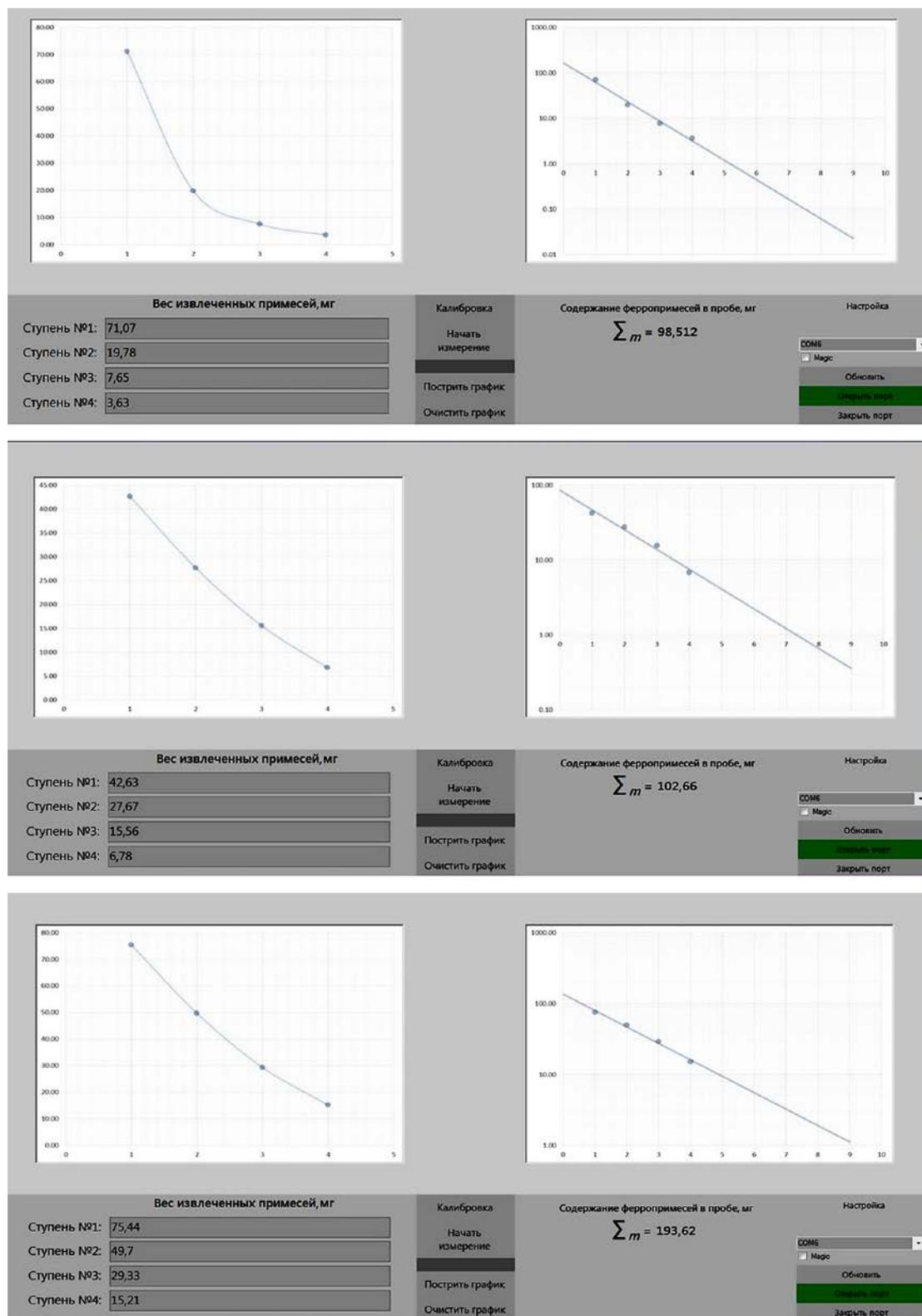
Полученные результаты также подтверждают важность учета гранулометрического состава и маг-

Рисунок 3

Фрагменты, иллюстрирующие полученные по программе для ЭВМ результаты определения содержания ферропримесей в муке, солоде и чае с помощью прибора-анализатора

Figure 3

Fragments illustrating the results obtained through computer software for determining the content of ferroimpurities in flour, malt, and tea using the analyzer



нитных свойств частиц, что было показано в исследованиях Agarwal и соавт. (2003), Cuerva и соавт. (2022), и Goncalves и соавт. (2024). Прибор-анализатор демонстрирует высокую эффективность в отделении ферромагнитных частиц различного размера и магнитной восприимчивости. Таким образом, результаты исследования подчеркивают значимость предварительного изучения характеристик ферропримесей для повышения точности контроля и выбора оптимального режима магнитной сепарации, что подтверждается результатами исследований по высокоградиентной сепарации (Li et al., 2019; Tripathy et al., 2017; Xue et al., 2022).

Кроме того, автоматизированный характер измерений в представленном приборе снижает человеческий фактор, повышая объективность анализа. Это соответствует ранее заявленной цели исследования — улучшению методов контроля, направленных на повышение качества пищевой продукции. Предлагаемое решение, с учетом высокого уровня цифрового контроля и возможности экстраполяции данных, позволяет избежать недостатков существующих методов, при которых часть ферропримесей остается в пробе даже после увеличенного числа циклов магнитного выделения (Сандуляк и соавт., 2011).

Несмотря на продемонстрированную эффективность, необходимо отметить ограничение прибора, заключающееся в его адаптации к сыпучим ингредиентам, специфика работа с которыми ранее подчеркивали исследователи, работающие с различными средами, такими как жидкости и пасты (Xue et al., 2020; Liu et al., 2021). Применение прибора с жидкими средами требует дополнительных инженерных решений, что представляет собой перспективное направление для дальнейшего расширения применения методики и увеличения ее универсальности в пищевой промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящего исследования подтверждают, что разработанный прибор-анализатор предоставляет надежное решение для точного определения содержания ферромагнитных примесей в пищевых ингредиентах. Проведенные тесты на муке, солоде и чае выявили, что прибор

способен зафиксировать превышение допустимых норм содержания ферропримесей в 2–3 раза. Данные результаты свидетельствуют о том, что предложенная методика, обеспечивающая автоматизированный и многократный контроль, превосходит традиционные методы как по точности измерений, так и по удобству эксплуатации.

Применение прибора-анализатора в промышленности представляет собой перспективное средство для улучшения контроля качества на предприятиях пищевой отрасли. Повышенная точность в определении содержания ферропримесей позволяет выявлять загрязнения, которые ранее могли оставаться незамеченными, что способствует улучшению мер по очистке сырья и, как следствие, повышению качества конечной продукции. Таким образом, внедрение данного устройства позволит пищевым предприятиям соответствовать более строгим стандартам безопасности и качества, что важно для укрепления доверия потребителей и повышения конкурентоспособности.

Ограничения текущей версии прибора заключаются в его адаптации к работе с сыпучими ингредиентами. Расширение его функциональности для работы с жидкими средами требует дополнительных инженерных решений, что будет направлено на универсализацию метода и охват более широкого спектра пищевых продуктов. Дальнейшее развитие прибора позволит создать более универсальное средство контроля качества, что послужит основой для последующих исследований и внедрения в других областях пищевой промышленности.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Полисмакова Мария Николаевна: концептуализация, проведение исследования, создание рукописи и ее редактирование.

Сандуляк Анна Александровна: Методология, верификация данных, применение математических методов анализа данных исследования, создание рукописи и ее редактирование.

Соловьев Никита Викторович: Проведение исследования, сбор материалов для исследования.

Сандуляк Дарья Александровна: Методология, редактирование рукописи.

Сандуляк Александр Васильевич: Верификация данных, формальный анализ, руководство исследованием.

Ершова Вера Александровна: Концептуализация, проведение исследования, создание черновика рукописи.

??????

Polismakova Maria: conceptualization, conducting a research and investigation process, writing — review and editing (preparation and creation of the published work).

Sandulyak Anna: methodology, data verification, applying mathematical methods to analyze study data, preparation, writing — review and editing (creation and presentation of the published work)

Soloviev Nikita: conducting the study, collecting materials for the study.

Sandulyak Darya: methodology, editing.

Sandulyak Alexander: data verification, formal analysis, supervision.

Ershova Vera: conceptualization, conducting a research and investigation process, writing — original draft preparation.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Glebov, L. A., Demskiy, A. B., Veden'yev, V. F., & Yablokov, A. Ye. (2010). *Tekhnologicheskoye oborudovaniye i potochnyye liniy predpriyatiy po pererabotke zerna*. M.: DeLi print.
- Зверев, С., Крементуло, А., Лавринович, С., Назаров, И., & Чавчанидзе, А. (2008). Исследование содержания железа и металломагнитных примесей в муке. *Хлебопродукты*, (2), 58–61.
- Zverev, S., Krementulo, A., Lavrinovich, S., Nazarov, I., Chavchanidze, A. (2008). Issledovaniye sodержaniya zheleza i metallomagnitnykh primesey v muke. *Khleboprodukty*, (2), 58–61. (In Russ.)
- Масюткин, Е. П. (2016). Извлечение ферромагнитных примесей из сыпучих сельскохозяйственных материалов. *Вестник КрасГАУ*, (11), 54–60.
- Masyutkin E.P. (2016). Extraction of Ferromagnetic Impressions from Bulk Agricultural Materials. *Vestnik KrasGAU*, (11), 54–60. (In Russ.)
- Мурашов, И. Д., Крюкова, Е. В., Горячева, Е. Д., Джабакова, А. Э., & Парамонов, Г. В. (2019). Обнаружение металлических и неметаллических включений в пищевых продуктах электрометрическим методом. *Health, Food & Biotechnology*, 1(4), 81–91. <https://doi.org/10.36107/hfb.2019.i4.s279>
- Murashov, I. D., Kryukova, E. V., Goryacheva, E. D., Dzhabakova, A. E., & Paramonov, G. V. (2019). Detection of metallic and non-metallic inclusions in food products by electrometric method. *Health, Food & Biotechnology*, 1(4), 81–91. (In Russ.) <https://doi.org/hfb.2019.i4.s279>
- Невзоров, В. Н., Ярум, А. И., & Самойлов, В. А. (2012). Совершенствование магнитных сепараторов для очистки зерна и муки. *Вестник КрасГАУ*, (5), 426–431.
- Nevzorov N.V., Yarum A.I., Samoilov V.A. (2012). Perfection of Magnetic Separators for Clearing Grind and the Flow. *Vestnik KrasGAU*, (5), 426–431. (In Russ.)
- Носова, М. В., Дремучева, Г. Ф. (2023). Исследования хлебопекарных свойств муки ржаной хлебопекарной обдирной, поставляемой на хлебопекарные предприятия РФ. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 69–82. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.385>
- Nosova M.V., Dremucheva G.F. (2023). Studies of the baking properties of rye flour, delivered to baking enterprises of the Russian Federation. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 69–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.385>
- Сандуляк А.В., Пугачева М.Н., Сандуляк А.А., Ершова В.А. (2021). Способ определения концентрации магнитовосприимчивых примесей в текучей среде. (Патент РФ № 2409425).
- Сандуляк Д.А., Киселев Д.О., Сандуляк А.А., Сандуляк А.В. (2021). Прибор для контроля магнитоактивных частиц в текучей среде. (Патент РФ на промышленный образец № 127016).
- Сандуляк Д.А., Сандуляк А.А., Киселев Д.О., Сандуляк А.В. (2021). Устройство для опытно-цифрового анализа содержания в текучей среде магнитно-восприимчивых частиц. (Патент РФ № 2752578).
- Сандуляк Д.А., Киселев Д.О., Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н. (2020). Программа ЭВМ для цифровой обработки операционных масс магнитно-восприимчивых частиц, выделяемых из текучей среды (Свидетельство № 2020665261).

- Сандуляк, А. А., Полисмакова, М. Н., Ершова, В. А., & Сандуляк, А. В. (2011). Контроль ферропримесей пищевых сред: недостатки и основные концепции совершенствования нормативно-метрологической базы. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 60–66.
- Sandulyak, A. A., Polismakova, M. N., Yershova, V. A., & Sandulyak, A. V. (2011). Ferroadmixtures food environments control: Lux and the basic of performance of the standard-metrological base. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 60–66. (In Russ.)
- Сандуляк, А. А., Полисмакова, М. Н., Ершов, Д. В., Сандуляк, А. В., Ершова, В. А., & Сандуляк, Д. А. (2010). Функциональная экстраполяция массово-операционной характеристики магнитофореза как основа прецизионного метода контроля феррочастиц. *Измерительная техника*, (8), 57–60.
- Sandulyak, A. A., Polismakova, M. N., Ershov, D. V., Sandulyak, A. V., Ershova, V. A., & Sandulyak, D. A. (2010). Functional extrapolation of the mass-operational characteristic of magnetophoresis as a basis for a precision method of monitoring ferroparticles. *Measurement Techniques*, (8), 57–60. (In Russ.)
- Фазулина, О. Ф., & Смирнов, С. О. (2020). Разработка системы управления безопасностью процесса производства макаронных изделий. *Техника и технология пищевых производств*, 50(4), 736–748. <http://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-736-748>
- Fazullina OF, Smirnov SO. (2020). New safety management system for pasta production. *Food Processing: Techniques and Technology*, 50(4), 736–748. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-736-748>
- Agarwal, A. K., Bijwe, J., & Das L. M. (2003). Wear assessment in a biodiesel fueled compression ignition engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 125, 820–826. <https://doi.org/10.1115/1.1501079>
- Cuerva, M.P., Gonçalves, A. C., Albuquerque, M. C. F., Chavarette, F. R., Outa, R., & Almeida, E. F. (2022). Analysis of the influence of contamination in lubricant by biodiesel in a pin-on-disk equipment. *Materials Research*, 25, e20210375. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0375>
- Gao, Y., Olivas-Martinez, M., Sohn, H. Y., Kim, H. G., & Kim, C. W. (2012). Upgrading of low-grade manganese ore by selective reduction of iron oxide and magnetic separation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 43(6), 1465–1475. <https://doi.org/10.1007/s11663-012-9731-6>
- Goncalves, A. C., Chavarette, F. R., Outa, R., & Godoi, L. H. A. (2024). Assistance of analytical ferrography in the interpretation of wear test results carried out with bio lubricants. *Tribology International*, 197, 109758. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109758>
- Hu, Z., Lu, D., Wang, Y., Zheng, X., & Zhang, Y. (2024). A novel pneumatic dry high-intensity magnetic separator for the beneficiation of fine-grained hematite. *Powder Technology*, 433, 119216. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119216>
- Jia, R., Ma, B., Zheng, C., Wang, L., Ba, X., Du, Q., & Wang, K. (2018). Magnetic properties of ferromagnetic particles under alternating magnetic fields: Focus on particle detection sensor applications. *Sensors*, 18(12), 4144. <https://doi.org/10.3390/s18124144>
- Koukabi, N., Kolvari, E., Zolfigol, M., Khazaei, A., Shaghaseemi, B. S., & Fasahati, B. (2012). A Magnetic particle-supported sulfonic acid catalyst: Tuning catalytic activity between homogeneous and heterogeneous catalysis. *Advanced Synthesis & Catalysis*, 354(10), 2001–2008. <http://dx.doi.org/10.1002/adsc.201100352>
- Kheshti, Z., Ghajar, K. A., Altaee, A., Kheshti, M. R. (2019). High-Gradient Magnetic Separator (HGMS) combined with adsorption for nitrate removal from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 212, 650–659. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.080>
- Li, W., Zhou, L., Han, Y., Xu, R. (2019). Numerical simulation and experimental verification for magnetic field analysis of thread magnetic matrix in high gradient magnetic separation. *Powder Technology*, 355, 300–308 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.024>
- Liu, X., Wang, J. Sun, K., Cheng, L., Wu, M., & Wang, X. (2021). Semantic segmentation of ferrography images for automatic wear particle analysis. *Engineering Failure Analysis*, 122, 105268. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105268>
- Macián, V., Payri, R., Tormos, B., & Montoro, L. (2006). Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systems. *Wear*, 260, 562–566. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.019>
- Shin S.-H., Kim, Y.-H., Jung, S.-K., Sun, K.-H., Kang, S.-G., Jeong S.-K., & Kim, H.-G. (2004). Combined performance of electrocoagulation and magnetic separation processes for treatment of dye wastewater. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 21(4), 806–810. <https://doi.org/10.1007/BF02705524>
- Singh, S., Sahoo, H., Rath, S. S., Sahu, A.K., & Das, B. (2015). Recovery of iron minerals from Indian iron ore slimes using colloidal magnetic coating. *Powder Technology*, 269, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.08.065>
- Tandon, N., Parey, A. (2006). Condition monitoring of rotary machines. *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing* (Springer Series in Advanced Manufacturing, pp. 109–136). Springer. https://doi.org/10.1007/1-84628-269-1_5
- Toneguzzo, P., Viau, G., & Fiévet, F. (2006). Monodisperse ferromagnetic metal particles: Synthesis by chemical routes, size control and magnetic characterizations. *Handbook of Advanced Magnetic Materials*, 37(19), 1193–1242. https://doi.org/10.1007/1-4020-7984-2_29
- Trafialek, J., Kaczmarek, S., & Kolanowski, W. (2016). The risk analysis of metallic foreign bodies in food products. *Journal of Food Quality*, 39, 398–407. <https://doi.org/10.1111/jfq.12193>
- Tripathy, S.K., & Suresh, N. (2017). Influence of particle size on dry high-intensity magnetic separation of paramagnetic mineral. *Advanced Powder Technology*, 28(3), 1092–1102. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.01.018>

- Wang, F., Tang, D., Gao, L., Dai, H., Jiang, P., & Lu, M. (2020). Dynamic capture and accumulation of multiple types of magnetic particles based on fully coupled multiphysics model in multiwire matrix for high-gradient magnetic separation. *Advanced Powder Technology*, 31(3), 1040–1050. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.12.020>
- Wang, Y., Xue, Z., Zheng, X., Lu, D., Li, S., & Li, X. (2019). Effect of matrix saturation magnetization on particle capture in high gradient magnetic separation. *Minerals Engineering*, 139, 105866. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105866>
- Xue, H., Han, C., Chen, M., Fan, G., & Zhou, J. (2022). Improving mechanical properties of manufactured sand concrete with high biotite content: Application of magnetic separation process and equipment optimization. *Construction and Building Materials*, 350, 128861. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128861>
- Xue, Z., Wang, Y., Zheng, X., Lu, D., & Li, X. (2020). Particle capture of special cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: A 3D simulation. *Separation and Purification Technology*, 237, 116375.
- Xue, Z., Wang, Y., Zheng, X., Lu, D., Sun, Z., & Jing, Z. (2022). Mechanical entrainment study by separately collecting particle deposit on matrix in high gradient magnetic separation. *Minerals Engineering*, 178, 107435. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107435>
- Ye F., Deng H., Guo Z., Wei B., & Ren X. (2023). Separation mechanism and experimental investigation of pulsating high gradient magnetic separation, *Results in Physics*, 49, 106482. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106482>