

Обнаружение металлических и неметаллических включений в пищевых продуктах электрометрическим методом

Мурашов Игорь Дмитриевич

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»
Адрес: 125080, Москва, Волоколамское шоссе, дом 11
E-mail: murashov_45@mail.ru*

Крюкова Елизавета Вячеславовна

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»
Адрес: 125080, Москва, Волоколамское шоссе, дом 11
E-mail: kryukovaev@gmail.com*

Горячева Елена Давидовна

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»
Адрес: 125080, Москва, Волоколамское шоссе, дом 11
E-mail: goryachevaed@mgupp.ru*

Джабакова Анна Эдуардовна

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»
Адрес: 125080, Москва, Волоколамское шоссе, дом 11
E-mail: dzhabakovaee@mgupp.ru*

Парамонов Григорий Викторович

ООО «СЕНСОРИЛАБ»

*Адрес: 121205, город Москва, тер. Сколково инновационного центра, Большой б-р, дом 42, стр. 1
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»
Адрес: 125080, Москва, Волоколамское шоссе, дом 11
E-mail: par@sensorylab.ru*

Одним из важнейших показателей качества и безопасности пищевой продукции является отсутствие посторонних включений. Посторонние включения представляют собой объекты, не характерные для данного пищевого продукта и видимые невооруженным глазом. К ним относятся различные упаковочные материалы (пластик, дерево, керамика и стекло), а также инородные материалы, которые могут попасть в пищевой продукт из-за нарушений технологических процессов или из-за неправильной эксплуатации оборудования (осколки кости в мясе, листья и стебли во фруктах, насекомые и др.). Анализ литературных источников свидетельствует о том, что перспективными средствами по обнаружению посторонних включений в пищевых продуктах являются такие виды контроля, которые, не изменяя качества, параметров и характеристик этих продуктов, позволяют по косвенным, второстепенным признакам обнаруживать посторонние включения. Целью настоящей работы являлась разработка метода определения основных параметров для обнаружения посторонних металлических и неметаллических включений в пищевых продуктах (в мясном фарше, в частности) на основе применения электромагнитных методов, селекции сигналов и автоматического удаления частиц из продукта в условиях непрерывного производственного процесса. Для изучения возможности применения электроконтактного метода для обнаружения посторонних частиц был выполнен расчет датчика-обнаружителя. Расчет величины сигнала от посторонней частицы производился методом вторичного поля, который был реализован в устройстве (приборе) для обнаружения. На основании экспериментальных данных была построена круговая фазовая диаграмма вторичных полей локальных тел, которая показывает, что металлы и неметаллы имеют фазы сигналов, отличные как от контролируемых пищевых продуктов, так и между собой. Из этого следует, что возможно

применение метода фазовой избирательности для селекции сигналов от металлических и неметаллических частиц, находящихся в пищевых продуктах. Разработанный обнаружитель состоит из датчиков и анализатора посторонних включений. Датчик состоит из 22 чувствительных элементов. Каждый из датчиков включен в мостовую измерительную схему. Проведенные исследования позволили разработать автоматическое устройство для удаления обнаруженных частиц без остановки технологического процесса при производстве колбасного фарша, экспериментальный образец которого был опробован в производственных условиях мясокомбината.

Ключевые слова: электроконтактный метод, контаминанты, металлические и неметаллические включения, методы удаления инородных включений, мясная промышленность

Введение

Одним из важнейших показателей качества и безопасности пищевой продукции является отсутствие посторонних включений. В связи с этим возникает актуальная задача: выявление наиболее эффективных методов и приборов обнаружения металлических и неметаллических включений и автоматического удаления их из продукта без остановки технологического процесса.

Посторонние включения представляют собой объекты, не характерные для данного пищевого продукта и видимые невооруженным глазом. К ним, в первую очередь, можно отнести различные упаковочные материалы (пластик, дерево, керамика и стекло). Также под определение «посторонние включения» подпадают инородные материалы, которые могут попасть в пищевой продукт из-за нарушений технологических процессов или из-за неправильной эксплуатации оборудования (осколки кости в мясе, листья и стебли во фруктах, насекомые и др.) (Marsh et al., 2004).

Объем и содержание контроля инородных тел зависит от особенностей предприятия, а именно от его размера, финансового состояния. Малое или среднее предприятие будет использовать недорогую ручную систему, в то время как крупное предприятие установит у себя автоматизированную или даже автоматическую систему (Marsh et al., 2004). Применение надлежащей производственной практики (GMP), а также внедрение системы НАССР позволяют предприятию минимизировать свои потери как финансовые, так и репутационные.

Пищевые предприятия разрабатывают и верифицируют процедуры анализа рисков появления инородных тел в пищевых продуктах. Внедрение такой процедуры позволяет выявлять стадии производства с риском загрязнения. В трудах (Trafialek, 2016) были предложены методы управления рисками и коммуникации риска. Эта процедура мо-

жет стать удобным инструментом для обеспечения безопасности пищевых продуктов и может использоваться на многих предприятиях пищевой промышленности, где высока опасность появления посторонних включений в готовой продукции.

Сразу несколько этапов жизненного цикла пищевого продукта подразумевают наличие потенциального риска загрязнения его инородными телами. Производители пищевых продуктов вынуждены проводить различные мероприятия по обнаружению и удалению посторонних включений путем просеивания и сортировки сырья, обнаружения металлических частиц с помощью металлодетектора или, в некоторых случаях, рентгенографического контроля готового продукта для удаления металла, костей, стекла и др. (Marsh et al., 2004). Многие производители используют различные системы сепарации для поддержания надлежащей производственной практики. К сожалению, ни просеивание, ни фильтрация не могут удалить 100% загрязняющих веществ.

Анализ имеющихся литературных источников показал, что для обнаружения посторонних включений в продуктах могут быть применены различные физические методы. Предпочтение отдается неинвазивным методам, поскольку они не нарушают целостности пищевых продуктов с точки зрения их состава и структуры (Mohd Khairi, 2018). Внедрение неинвазивной техники в качестве инструмента мониторинга приветствуется производителями пищевой продукции. К неинвазивным методам в первую очередь относят: оптические, электрометрические, рентгенографический, тепловизионный, ультразвуковой, радиоактивный, магнитометрический, спектроскопический и др. Одним из наиболее распространенных посторонних включений являются металлы. Металлы, с одной стороны, имеют важное значение для нормального протекания физиологических процессов в организме человека, а с другой стороны, они могут выступать в качестве загрязнителей и представлять опреде-

ленный риск для здоровья человека. Они могут вызывать отравления (тяжелые металлы (Coelho et al., 2016)), а также наносить повреждения внутренним органам человека. Продукты могут вступать в контакт с металлами на разных этапах производственного процесса (промышленное оборудование, резервуары для хранения, инструменты и первичная упаковка) (Montanari, 2015).

Наиболее распространенным способом детекции металлических загрязнителей в различных отраслях промышленности, в т.ч. и в пищевой, является рентгенография (Toyofuku & Haff, 2012). Рентгеновские системы применяются при производстве и контроле качества мяса, фруктов, овощей, круп, молочных продуктов, кондитерских изделий, готовых блюд, полуфабрикатов и хлебобулочных изделий (Thomas et al., 1996).

Помимо металлов рентгеновские системы могут обнаруживать и другие загрязнения, такие как камни, стекло, пластик ПВХ, кости, бетон, керамику, тефлоновый пластик, сгустки сахара или ароматизаторов и др. Однако рентгеновские аппараты не могут обнаружить бумагу, картон, дерево, волосы, насекомых, тонкое стекло, пластмассы низкой плотности и пористые камни (Graves et al., 1994; Haff & Toyofuku, 2008; Nielsen et al., 2013).

Особый интерес представляет рентгенография для обнаружения загрязняющих веществ в упакованных пищевых продуктах, в том числе для автоматической проверки консервированной продукции (Penman et al., 1992).

Рентгеновский аппарат, специально спроектированный для использования в производстве пищевых продуктов, отличается от диагностического медицинского прибора. Он не способствует загрязнению продуктов питания радионуклидами, хотя иногда рентгеновское излучение вызывает ионизацию продукта, что приводит к изменению его вкуса (Ohtani et al., 2015).

Ультразвуковые методы детекции инородных тел в продуктах питания широко распространены, менее затратны, более безопасны и легче в эксплуатации по сравнению с рентгенографическими методами (Hæggeström & Luukkala, 2001).

Особенностью ультразвуковой визуализации является сложный способ взаимодействия ультразвукового сигнала с материалом, например продуктами питания. Эти параметры включают затухание / поглощение, обратное рассеяние, скорость и нелинейность (Marsh et al., 2004).

С использованием ультразвука методом импульсного эха была установлена возможность обнаружения в жидкой пище инородных тел радиусом всего 0,1 мм (Patel, 2016).

Для обнаружения инородных тел в пищевых продуктах используются разнообразные оптические методы. Так, инородное тело шириной 1 мм в пищевом продукте было успешно идентифицировано с использованием системы формирования изображения субволновой длины (Ok et al., 2018). Для точного и быстрого обнаружения посторонних материалов в пищевых продуктах используют терагерцовую визуализацию – новую технологию неразрушающего обнаружения с преимуществами неионизации и спектроскопического снятия отпечатков пальцев (Wang et al., 2018). Этот метод позволяет обнаруживать металлические и неметаллические инородные тела (Jördens, C., 2008).

На предприятиях для определения качества пищи по цвету широко используются оптические системы сортировки. Оптические сортировочные машины могут обнаруживать различные типы загрязнений, такие как стекло, палки, камни, насекомые, гнилые вещества и т.д.

В ряде работ описано применение высокотемпературного сверхпроводящего квантового интерферометра-магнитометра (СКВИД-магнитометр), работающего по принципу закона электромагнитной индукции Фарадея, для обнаружения металлических загрязнителей (магнитных или немагнитных, таких как медь или алюминий) в пищевых продуктах и лекарственных препаратах (Tanaka et al., 2004; Tanaka et al., 2009; Tanaka et al., 2012; Tanaka et al., 2013; Tanaka et al., 2014; Ohtani et al., 2015; Yagi et al., 2016). Для проверки продукции фармацевтической и пищевой промышленности в конце производственной линии до упаковывания в металлизированную упаковку разработали систему контроля для обнаружения магнитного остатка загрязняющих веществ с использованием СКВИД-магнитометра (Krause, 2005).

Магнитные сепараторы часто применяются в пищевой промышленности. Они дешевы и легки в эксплуатации. Однако они могут обнаруживать только железные загрязнения. Для всех остальных металлов они не эффективны.

Микроволновый метод удаления инородных включений может охватывать широкий спектр загрязнителей пищевых продуктов в силу мощности установки и сложности ее конструкции. Данный метод охватывает очень маленькие части-

цы загрязняющих веществ, и в большинстве случаев их местоположение легко определить. Главное преимущество микроволновой системы обнаружения – ее способность обнаруживать широкий спектр загрязняющих веществ в различных средах и упаковке.

Системы обнаружения электрического импеданса представляют собой нечто среднее между обычными системами обнаружения металлических включений и системами на основе микроволн. Он работает лучше обычного металлодетектора, т.к. способен обнаружить неметаллические предметы, а именно дерево, пластик и стекло. Однако электрический импеданс редко используется при обнаружении инородных тел в пищевых продуктах.

В настоящее время в России для обнаружения в пищевых продуктах, в т.ч. в мясопродуктах, посторонних включений главным образом используются обнаружители, основанные на использовании индуктивного метода. Данный метод позволяет фиксировать только металлические частицы, в то время как в продукты возможно попадание неметаллических частиц: пластмассы, стекла, дерева, песка и других. Имеющиеся недостатки существующих устройств обнаружения посторонних включений снижают их эффективность и исключают возможность применения для сплошного контроля качества в условиях непрерывного производства.

Информация, полученная при контроле выпускаемой продукции, должна регистрировать не только наличие посторонних включений, но и устанавливать причинно-следственные связи возникновения их. Крайне важно на предприятиях пищевой промышленности обеспечить надежный контроль качества выпускаемой продукции современными методами, не нарушающими ее целостность.

Проведенный анализ литературных источников позволяет говорить о том, что перспективными средствами по обнаружению посторонних включений в пищевых продуктах являются такие виды контроля, которые, не изменяя качества, параметров и характеристик этих продуктов, позволяют по косвенным, второстепенным признакам обнаруживать посторонние включения.

Целью настоящей работы являлась разработка метода определения основных параметров для обнаружения посторонних металлических и неметаллических включений в мясном фарше на основе применения электромагнитных методов, селек-

ции сигналов и автоматического удаления частиц из продукта в условиях непрерывного производственного процесса.

Методика исследования

Для изучения возможности применения электроконтактного метода для обнаружения посторонних частиц был выполнен расчет электроконтактного датчика-обнаружителя.

Расчет величины сигнала от посторонней частицы производился методом вторичного поля, который был реализован в устройстве (приборе) для обнаружения.

В случае попадания частицы в поле датчика напряженность поля в датчике изменится, она будет равна:

$$\bar{E} = \bar{E}_0 + \bar{E}_p,$$

где $\bar{E}_0$ – напряжение поля датчика без частицы;

$\bar{E}_p$ – напряжение поля частицы.

Допустим, частица имеет сферическую форму, а внешнее поле однородно. Выбираем сферическую систему координат с осью Z, направленной по вектору внешнего поля $\bar{E}_0$ (рисунок 1).

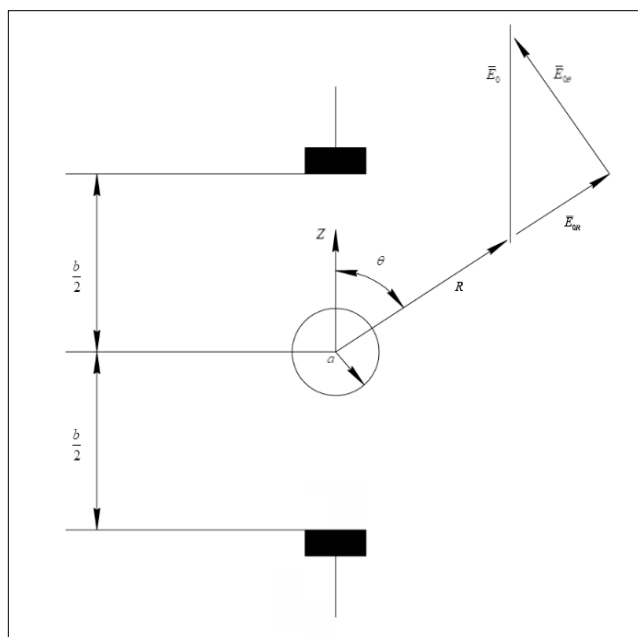


Рисунок 1. Сферическая система координат с осью Z, направленная по вектору внешнего поля $\bar{E}_0$

Решение уравнения Лапласа для данного случая дает следующие результаты для напряженности поля в точке «а»:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_R &= \dot{E} \left[1 + 2\dot{\eta} \frac{a^3}{R^3} \right] \cos \theta \\ \dot{E}_\theta &= \dot{E}_0 \left[1 - \dot{\eta} \frac{a^3}{R^3} \right] \sin \theta \end{aligned} \right\},$$

где $\dot{\eta} = \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_e)}{(\varepsilon_i + 2\varepsilon_e)}$,

где, в свою очередь, $\dot{\varepsilon}_i$ – проницаемость частицы;

$\dot{\varepsilon}_e$ – проницаемость продукта.

Для случая металлической частицы можно полагать $\dot{\varepsilon}_i \rightarrow \infty$.

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{0,R} &= \dot{E}_0 \left[1 + 2 \frac{a^3}{R^3} \right] \cos \theta \\ \dot{E}_{0,\theta} &= -\dot{E}_0 \left[1 - \frac{a^3}{R^3} \right] \sin \theta \end{aligned} \right\}$$

Слагающие частицы поля:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{p,R} &= \dot{E}_0 \cdot 2\dot{\eta} \frac{a^3}{R^3} \cos \theta \\ \dot{E}_{p,\theta} &= \dot{E}_0 \cdot \dot{\eta} \frac{a^3}{R^3} \sin \theta \end{aligned} \right\}$$

Для металлических частиц:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{p,R} &= \dot{E}_0 \cdot 2 \frac{a^3}{R^3} \cos \theta \\ \dot{E}_{p,\theta} &= \dot{E}_0 \cdot \frac{a^3}{R^3} \sin \theta \end{aligned} \right\}$$

Для вычисления величины сигнала от посторон-

ней частицы примем $\theta = 0$ и $R = \frac{b}{2}$, тогда формулы примут вид:

Для диэлектрических частиц:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{p,R} &= \dot{E}_0 \cdot 2\dot{\eta} \frac{a^3}{\left(\frac{b}{2}\right)^3} \\ \dot{E}_{p,\theta} &= 0 \\ \dot{E}_R &= \dot{E}_0 \left[1 + 2\dot{\eta} \frac{a^3}{\left(\frac{b}{2}\right)^3} \right] \\ \dot{E}_\theta &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Для металлических частиц:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{p,R} &= \dot{E}_0 \cdot 2 \frac{a^3}{\left(\frac{b}{2}\right)^3} \\ \dot{E}_{p,\theta} &= 0 \\ \dot{E}_R &= \dot{E}_0 \left[1 + 2\dot{\eta} \frac{a^3}{\left(\frac{b}{2}\right)^3} \right] \\ \dot{E}_\theta &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Поскольку датчик можно рассматривать как линейную электрическую систему, напряжение сигнала на его выходе будет прямо пропорционально величине напряжения поля частицы. Кроме того,

необходимо учесть, что $\dot{U}_c = \dot{E}_p \cdot b$, тогда окончательно получаем (для диэлектрических частиц) уравнение вида:

$$\left. \begin{aligned} U_c &= R\dot{E}_0 \cdot \dot{\eta} \frac{16a^3}{b^2} \\ \varphi_c &= \varphi_0 + \arctg \frac{\text{Im } \dot{\eta}}{\text{Re } \dot{\eta}} \end{aligned} \right\},$$

где $\text{Im } \dot{\eta}$ – мнимая часть;

$\text{Re } \dot{\eta}$ – действительная часть.

$$\left. \begin{aligned} U_c &= k \cdot E_0 \cdot \frac{16a^3}{b^2} \\ \varphi_c &= \varphi_0 \end{aligned} \right\},$$

где k – коэффициент пропорциональности, опре-

деляемой конкретной электрической схемой датчика.

На основании экспериментальных данных построена круговая фазовая диаграмма (рисунок 2) вторичных полей локальных тел. Как видно из приведенной диаграммы, металлы и неметаллы имеют фазы сигналов, отличные как от контролируемых пищевых продуктов, так и между собой. Из этого следует, что возможно применение метода фазовой избирательности для селекции сигналов от металлических и неметаллических частиц, находящихся в пищевых продуктах.

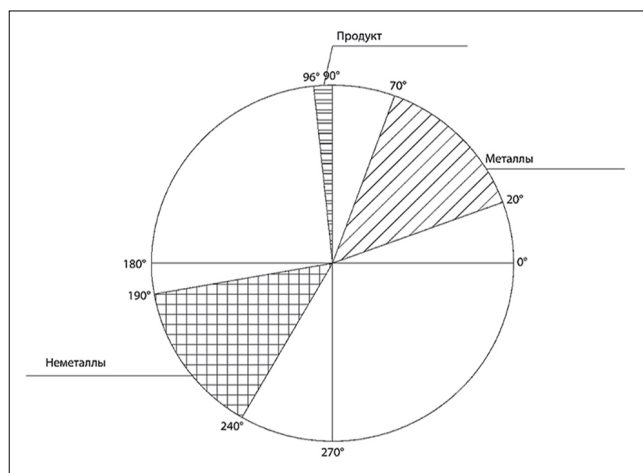


Рисунок 2. Круговая фазовая диаграмма вторичных полей локальных тел и продукта

Амплитуда напряжения сигнала изменяется линейно в зависимости от изменения размеров посторонних частиц, что может быть использовано для определения размеров обнаруженных частиц. Фазы напряжения сигнала от частиц металлического и неметаллического характера значительно отличаются друг от друга, что используется для определения типа посторонних частиц. Аналитически полученные выводы, основанные на теоретических предположениях, могут быть использованы для разработки обнаружителя посторонних включений как металлических, так и неметаллических.

Результаты и их обсуждение

Для создания электроконтактного датчика-обнаружителя был произведен расчет величины сигнала от посторонней частицы методом вторичного поля. Были получены зависимости величины сигнала для различных тел от расстояния между электродами и размеров частиц.

Было показано, что посторонние включения (как металлические, так и неметаллические) имеют фазы сигналов, отличные как от пищевых контролируемых объектов, так и между собой, что позволяет применять метод фазовой избирательности для селекции сигналов.

На основании результатов аналитических расчетов, основанных на теории электромагнитного поля, и экспериментальных исследований был разработан макет обнаружителя для контроля мясного фарша. Разработанный нами обнаружитель состоит из датчиков и анализатора посторонних включений. Датчик состоит из 22 чувствительных элементов. Каждый из датчиков с 1-го по 20-ый и 21-ый датчик включены в мостовую измерительную схему.

В любой момент времени работают один из датчиков с 1-ого по 20-ый и 21-ый датчик. С помощью коммутации осуществляется последовательное подключение датчиков (с 1-ого по 20-ый) к измерительной схеме. В ее состав входят схема управления коммутацией, усилитель сигналов, поступающих с мостовой измерительной схемы, а также сигнализатор наличия продукта в трубопроводе, который работает совместно с 22-ым датчиком. Кроме того, в состав «датчика» входит выталкиватель посторонних включений, установленный в корпусе датчика. В состав анализатора посторонних включений входят схема фазового детектора, селектор полярности и схема управления электромагнитных выталкивателя, счетчик металлических частиц, счетчик неметаллических включений, блок питания.

С макетом обнаружителя проводились испытания в лабораторных и производственных условиях на мясокомбинатах.

При испытаниях было установлено, что уверенно обнаруживаются посторонние включения из различных материалов, при этом анализатор четко различал металлические и неметаллические частицы, что регистрировалось сигналами соответствующих индикаторов.

Конструкция прибора позволяет с достаточной точностью обнаруживать и автоматически удалять посторонние металлические и неметаллические включения из продукта без остановки технологического процесса.

Разработанный прибор по обнаружению металлических и неметаллических включений с ав-

томатическим удалением без остановки технологического процесса является уникальным устройством, не производящимся нигде за границей и в Российской Федерации. На сегодняшний день производятся обнаружители только металлических включений. Т.к. в разработке используется уникальный метод по обнаружению и удалению посторонних включений – метод вторичного поля, было разработано «техническое задание» на разработку опытного образца для контроля мясного фарша на мясокомбинатах.

Заключение

Предлагаемая методика контроля посторонних включений в продукт, основанная на электроконтактном способе с селекцией сигналов, является в настоящее время наиболее перспективной и универсальной. Она позволяет по косвенным, второстепенным признакам обнаруживать посторонние включения, не изменяя при этом качества, параметров и характеристик этих продуктов.

Литература

- Coelho, L. M., Pessoa, D. R., Oliveira, K.M., de Sousa, P. A. R., da Silva, L. A., & Coelho, N. M. M. (2016). Potential Exposure and Risk Associated with Metal Contamination in Foods. *Significance, Prevention and Control of Food Related Diseases*, 99-123. <https://doi.org/10.5772/62683>
- Graves, M., Batchelor, B. G., & Palmer, S. C. (1994). Three-dimensional X-ray inspection of food products. Applications of digital image. In *Applications of Digital Image*, 2298, 248.
- Hægström, E., & Luukkala, M. (2001). Ultrasound detection and identification of foreign bodies in food products. *Food Control*, 12(1), 37–45. [https://doi.org/10.1016/s0956-7135\(00\)00007-4](https://doi.org/10.1016/s0956-7135(00)00007-4)
- Jördens, C. (2008). Detection of foreign bodies in chocolate with pulsed terahertz spectroscopy. *Optical Engineering*, 47(3), 037003. <https://doi.org/10.1117/1.2896597>
- Krause, H.-J., Panaitov, G. I., Wolters, N., Lomparski, D., Zander, W., Zhang, Y., Oberdoerffer, E., Wollersheim, D., & Wilke, W. (2005). Detection of Magnetic Contaminations in Industrial Products Using HTS SQUIDS. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2), 729–732. <https://doi.org/10.1109/tasc.2005.850027>
- Marsh, R.A., & Angold R.E. (2004). Identifying potential sources of foreign bodies in the supply chain. In: M. Edwards (Ed.) *Detecting foreign bodies in food*. Woodhead Publishing Ltd.
- Mohd Khairi, M. T., Ibrahim, S., Md Yunus, M. A., & Faramarzi, M. (2018). Noninvasive techniques for detection of foreign bodies in food: A review. *Journal of Food Process Engineering*, e12808. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12808>
- Montanari, A. (2015). Inorganic Contaminants of Food as a Function of Packaging Features. *SpringerBriefs in Molecular Science*, 17–41. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14827-4_2
- Nielsen, M. S., Lauridsen, T., Christensen, L. B. & Feidenhans'l, R. (2013). X-ray dark-field imaging for detection of foreign bodies in food. *Food Control*, 30(2), 531–535. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.08.007>
- Ohtani, T., Narita, Y., Tanaka, S., Ariyoshi, S. & Suzuki, S. (2015). Development of three channel SQUIDS contaminant detector for food inspection. In *2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG)*. <https://doi.org/10.1109/intmag.2015.7157575>
- Ok, G., Kim, H. J., Chun, H. S., & Choi, S.-W. (2014). Foreign-body detection in dry food using continuous sub-terahertz wave imaging. *Food Control*, 42, 284–289. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.02.021>
- Patel, D., Davies, E. R. & Hannah, I. (1995). Towards a breakthrough in the detection of contaminants in food products. *Sensor Review*, 15(2), 27–28. <https://doi.org/10.1108/02602289510085570>
- Penman, D. W., Olsson, O. J. & Beach, D. A. (1992). Automatic x-ray inspection of canned products for foreign material. In *Machine Vision Applications. Architectures, and Systems Integration*, 1823. <https://doi.org/10.1117/12.132090>
- Schatzki, T. F., Young, R., Haff, R. P., Eye, J., & Wright, G. (1996). Visual detection of particulates in x-ray images of processed meat products, *Optical Engineering*, 35(8). <https://doi.org/10.1117/1.601010>
- Tanaka, S., Akai, T., Hatsukade, Y., Ohtani, T., & Suzuki, S. (2009). High Tc SQUID System for Detection of Small Metallic Contaminant in Industrial Products. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3), 882–885. <https://doi.org/10.1109/tasc.2009.2019655>
- Tanaka, S., Akai, T., Takemoto, M., Hatsukade, Y., Ohtani, T., Ikeda, Y., & Suzuki, S. (2010). Metallic Contaminant Detection using a High-Temperature Superconducting Quantum Interference Devices Gradiometer. *Chinese Physics Letters*, 27(8), 088503. <https://doi.org/10.1088/0256-307x/27/8/088503>
- Tanaka, S., Hatsukade, Y., Ohtani, T., & Suzuki, S. (2009). SQUID sensor application for small metallic particle detection. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(7), 880–883. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.11.060>
- Tanaka, S., Natsume, M., Uchida, M., Hotta, N.,

- Matsuda, T., Spanut, Z. A., & Hatsukade, Y. (2004). Measurement of metallic contaminants in food with a high-TcSQUID. *Superconductor Science and Technology*, 17(4), 620–623. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/4/009>
- Tanaka, S., Ohtani, T., Uchida, Y., Hatsukade, Y., & Suzuki, S. (2014). Ultra-Sensitive Contaminant Detection System Using High-Tc SQUID. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 28(2), 667–670. <https://doi.org/10.1007/s10948-014-2668-z>
- Tanaka, S., Uchida, Y., Kitamura, Y., Hatsukade, Y., Ohtani, T., & Suzuki, S. (2012). Development of High-T c SQUID and Application to Ultra-Sensitive Contaminant Detection System. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 26(4), 845–849. <https://doi.org/10.1007/s10948-012-1944-z>
- Toyofuku, N., & Haff, R. P. (2012). Computer vision for foreign body detection and removal in the food industry. *Computer Vision Technology in the Food and Beverage Industries*, 181–205. <https://doi.org/10.1533/9780857095770.2.181>
- Traffialek, J., Kaczmarek, S., & Kolanowski, W. (2016). The Risk Analysis of Metallic Foreign Bodies in Food Products. *Journal of Food Quality*, 39(4), 398–407. <https://doi.org/10.1111/jfq.12193>
- Wang, C., Zhou, R., Huang, Y., Xie, L. & Ying, Y. (2018). Terahertz spectroscopic imaging with discriminant analysis for detecting foreign materials among sausages. *Food Control*, 97, 100-104. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.10.024>

Detection of Metallic and Non-Metallic Inclusions in Food Products by Electrometric Method

Igor D. Murashov

*Moscow State University of Food Production
11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation
E-mail: murashov_45@mail.ru*

Elizaveta V. Kryukova

*Moscow State University of Food Production
11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation
E-mail: kryukovaev@gmail.com*

Elena D. Goryacheva

*Moscow State University of Food Production
11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation
E-mail: goryachevaed@mgupp.ru*

Anna E. Dzhabakova

*Moscow State University of Food Production
11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation
E-mail: dzhabakovaae@mgupp.ru*

Grigory V. Paramonov

*SensoryLAB LLC
42/1 Bolshoy bulvar, Ter. Skolkovo Innovation Center,
Moscow, 121205, Russian Federation
Moscow State University of Food Production
11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation
E-mail: par@sensorylab.ru*

One of the most important indicators of the quality and safety of food products is the absence of extraneous inclusions. Extraneous inclusions are objects that are not typical for this food product and are invisible to the unaided eye. These include various packaging materials (plastic, wood, ceramics and glass), as well as foreign materials that can get into the food product due to violations of technological processes or due to improper operation of equipment (bone fragments in meat, leaves and stems in fruit, insects, etc.). Analysis of literature sources shows that promising means for detecting extraneous inclusions in food products are such types of control that, without changing the quality, parameters and characteristics of these products, allow to detect extraneous inclusions for indirect, secondary signs. The aim of the current study was to develop a method for determining the main parameters for detecting extraneous metallic and non-metallic inclusions in food products (in mincemeat, in particular) based on the use of electromagnetic methods, signal selection and automatic removal of particles from the product in a continuous production process. To study the possibility of using the electric contact method for detecting foreign particles, a detector sensor was estimated. The value of the signal from an extraneous particle was computed by the secondary field method, which was implemented in the device for detection. Based on experimental data, a circular phase diagram of secondary fields of local bodies was constructed, which shows that metals and non-metals have signal phases that differ both from controlled food products and between themselves. It follows that it is possible to use the phase selectivity method to select signals from metallic and non-metallic particles found in food products. The developed detector consists of sensors and an analyzer of extraneous inclusions. The sensor consists of 22 sensitive elements. Each of the sensors is included in the bridge measuring circuit. The research made it possible to develop an automatic device for removing detected particles without stopping the technological process

in the production of spam, an experimental sample of which was tested in the production conditions of a meat-processing plant.

Keywords: electric contact method, contaminants, metallic and non-metallic inclusions, methods for removing extraneous inclusions, meat industry

References

- Coelho, L. M., Pessoa, D. R., Oliveira, K.M., de Sousa, P. A. R., da Silva, L. A., & Coelho, N. M. M. (2016). Potential Exposure and Risk Associated with Metal Contamination in Foods. *Significance, Prevention and Control of Food Related Diseases*, 99-123. <https://doi.org/10.5772/62683>
- Graves, M., Batchelor, B. G., & Palmer, S. C. (1994). Three-dimensional X-ray inspection of food products. Applications of digital image. In *Applications of Digital Image*, 2298, 248.
- Hæggström, E., & Luukkala, M. (2001). Ultrasound detection and identification of foreign bodies in food products. *Food Control*, 12(1), 37-45. [https://doi.org/10.1016/s0956-7135\(00\)00007-4](https://doi.org/10.1016/s0956-7135(00)00007-4)
- Jördens, C. (2008). Detection of foreign bodies in chocolate with pulsed terahertz spectroscopy. *Optical Engineering*, 47(3), 037003. <https://doi.org/10.1117/1.2896597>
- Krause, H.-J., Panaitov, G. I., Wolters, N., Lomparski, D., Zander, W., Zhang, Y., Oberdoerffer, E., Wollersheim, D., & Wilke, W. (2005). Detection of Magnetic Contaminations in Industrial Products Using HTS SQUIDS. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2), 729-732. <https://doi.org/10.1109/tasc.2005.850027>
- Marsh, R.A., & Angold R.E. (2004). Identifying potential sources of foreign bodies in the supply chain. In: M. Edwards (Ed.) *Detecting foreign bodies in food*. Woodhead Publishing Ltd.
- Mohd Khairi, M. T., Ibrahim, S., Md Yunus, M. A., & Faramarzi, M. (2018). Noninvasive techniques for detection of foreign bodies in food: A review. *Journal of Food Process Engineering*, e12808. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12808>
- Montanari, A. (2015). Inorganic Contaminants of Food as a Function of Packaging Features. *SpringerBriefs in Molecular Science*, 17-41. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14827-4_2
- Nielsen, M. S., Lauridsen, T., Christensen, L. B. & Feidenhans'l, R. (2013). X-ray dark-field imaging for detection of foreign bodies in food. *Food Control*, 30(2), 531-535. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.08.007>
- Ohtani, T., Narita, Y., Tanaka, S., Ariyoshi, S. & Suzuki, S. (2015). Development of three channel SQUIDS contaminant detector for food inspection. In 2015 *IEEE Magnetism Conference (INTERMAG)*. <https://doi.org/10.1109/intmag.2015.7157575>
- Ok, G., Kim, H. J., Chun, H. S., & Choi, S.-W. (2014). Foreign-body detection in dry food using continuous sub-terahertz wave imaging. *Food Control*, 42, 284-289. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.02.021>
- Patel, D., Davies, E. R. & Hannah, I. (1995). Towards a breakthrough in the detection of contaminants in food products. *Sensor Review*, 15(2), 27-28. <https://doi.org/10.1108/02602289510085570>
- Penman, D. W., Olsson, O. J. & Beach, D. A. (1992). Automatic x-ray inspection of canned products for foreign material. In *Machine Vision Applications. Architectures, and Systems Integration*, 1823. <https://doi.org/10.1117/12.132090>
- Schatzki, T. F., Young, R., Haff, R. P., Eye, J., & Wright, G. (1996). Visual detection of particulates in x-ray images of processed meat products, *Optical Engineering*, 35(8). <https://doi.org/10.1117/1.601010>
- Tanaka, S., Akai, T., Hatsukade, Y., Ohtani, T., & Suzuki, S. (2009). High Tc SQUID System for Detection of Small Metallic Contaminant in Industrial Products. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3), 882-885. <https://doi.org/10.1109/tasc.2009.2019655>
- Tanaka, S., Akai, T., Takemoto, M., Hatsukade, Y., Ohtani, T., Ikeda, Y., & Suzuki, S. (2010). Metallic Contaminant Detection using a High-Temperature Superconducting Quantum Interference Devices Gradiometer. *Chinese Physics Letters*, 27(8), 088503. <https://doi.org/10.1088/0256-307x/27/8/088503>
- Tanaka, S., Hatsukade, Y., Ohtani, T., & Suzuki, S. (2009). SQUID sensor application for small metallic particle detection. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(7), 880-883. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.11.060>
- Tanaka, S., Natsume, M., Uchida, M., Hotta, N., Matsuda, T., Spanut, Z. A., & Hatsukade, Y. (2004). Measurement of metallic contaminants in food with a high-TcSQUID. *Superconductor Science and Technology*, 17(4), 620-623. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/4/009>
- Tanaka, S., Ohtani, T., Uchida, Y., Hatsukade, Y., & Suzuki, S. (2014). Ultra-Sensitive Contaminant Detection System Using High-Tc SQUID. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 28(2), 667-670. <https://doi.org/10.1007/s10948-014-2668-z>

- Tanaka, S., Uchida, Y., Kitamura, Y., Hatsukade, Y., Ohtani, T., & Suzuki, S. (2012). Development of High-T_c SQUID and Application to Ultra-Sensitive Contaminant Detection System. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 26(4), 845–849. <https://doi.org/10.1007/s10948-012-1944-z>
- Toyofuku, N., & Haff, R. P. (2012). Computer vision for foreign body detection and removal in the food industry. *Computer Vision Technology in the Food and Beverage Industries*, 181–205. <https://doi.org/10.1533/9780857095770.2.181>
- Trafiak, J., Kaczmarek, S., & Kolanowski, W. (2016). The Risk Analysis of Metallic Foreign Bodies in Food Products. *Journal of Food Quality*, 39(4), 398–407. <https://doi.org/10.1111/jfq.12193>
- Wang, C., Zhou, R., Huang, Y., Xie, L. & Ying, Y. (2018). Terahertz spectroscopic imaging with discriminant analysis for detecting foreign materials among sausages. *Food Control*, 97, 100-104. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.10.024>