International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

МУЛТИСЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ НА РАЗВАЛЯНЕТО НА МЛЕЧНИ И МЕСНИ ПРОДУКТИ ЧРЕЗ ОТЧИТАНЕ НА АМОНЯЧНИ ЕМИСИИ

Никола Ваклинов[1], Пенка Янева[2]

[1] УХТ - Пловдив, бул. „Марица“ 26, Пловдив, България
[2] УХТ - Пловдив, бул. „Марица“ 26, Пловдив, България
**Кореспондиращ автор: niksata_98@abv.bg*

MULTISENSOR SYSTEM FOR MONITORING SPOILAGE IN DAIRY AND MEAT PRODUCTS VIA AMMONIA EMISSION DETECTION

Nikola Vaklinov[1], Penka Yaneva[2]

[1] UFT - Plovdiv, 26 Maritsa Street, Plovdiv, Bulgaria
[2] UFT - Plovdiv, 26 Maritsa Street, Plovdiv, Bulgaria
**Corresponding author: niksata_98@abv.bg*

Abstract

Food spoilage detection requires continuous monitoring of biological degradation indicators, primarily driven by microbial proteolysis in protein-rich matrices. This study aims to develop a low-cost, Arduino-based multisensory system to trace real-time spoilage patterns in yogurt (3.6% fat) and pork shoulder meat by analyzing volatile ammonia emissions relative to environmental parameters. The experimental apparatus houses an Arduino Uno, an MQ-135 gas sensor, a DHT-11 temperature/humidity sensor, a 16x2 LCD, and a microSD module inside a sealed testing chamber. Sensor data were automatically logged at 30-minute intervals over several days and extracted for offline analytical processing. The system successfully captured the correlation between ambient temperature, relative humidity, and dynamic ammonia concentration spikes. These spikes directly correspond to casein breakdown in yogurt and myofibrillar protein degradation in pork, releasing volatile nitrogenous compounds. Autonomous environmental data logging combined with gas sensing provides a reliable, non-destructive method for evaluating food freshness dynamics. The research offers an accessible, scalable IoT-ready prototype that links physical sensor readings with chemical protein degradation mechanisms, providing practical value for quality control in food processing and smart storage systems.

Keywords: Food Spoilage, MQ-135 Sensor, Protein Degradation, Casein Breakdown, Arduino Data Logger.

ВЪВЕДЕНИЕ

Контролът на качеството и безопасността при бързоразвалящите се храни си остава сериозно предизвикателство както за логистиката, така и за хранителната индустрия. Стандартните лабораторни анализи за оценка на свежестта обикновено са „унищожителни“ за пробата, изискват доста време за подготовка и на практика са неприложими за непрекъснат мониторинг в реална среда.

Когато храни с високо съдържание на протеини – например кисело мляко или свинско месо – започнат да се развалят, в тях протичат активни процеси на микробиологична протеолиза. Микроорганизмите разграждат белтъчните структури (казеина в млечните продукти и миофибриларните протеини в месото), при което се отделят летливи азотни съединения, като основният компонент тук е амонякът. Ако следим концентрацията на тези

емисии паралелно с микроклиматичните параметри като температура и влажност, получаваме възможност за непрекъснат и безразрушителен контрол върху степента на разваляне.

Основната цел на това проучване е да проектираме, сглобим и тестваме достъпна мултисензорна система на базата на Arduino, която да регистрира амонячните емисии в реално време.

За постигането ѝ си поставихме следните конкретни задачи:

- Да изградим херметична тестова камера, оборудвана с нужните сензори за газове и микроклимат.
- Да разработим софтуерен даталогър (Data Logger), който да записва информацията на microSD карта на равни интервали от 30 минути.
- Да проведем реални експерименти, чрез които да отчетем и анализираме динамиката на разваляне при кисело мляко (3.6% масленост) и свинска плешка.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Анализ на съществуващите технологии и необходимост от мултисензорен подход.

Обект на непрекъснат контрол в хранителната промишленост са редица физикохимични и органолептични показатели: цвят, температура, относителна влажност, съдържание на летливи метаболити и структура на продукта. Литературният обзор показва, че единичните сензорни източници (например само измерване на температура в една точка) са недостатъчни, тъй като микроклиматът в хладилните камери и опаковките е неравномерен, а температурните отклонения ускоряват ензимното разграждане.

За преодоляване на тези ограничения се прилагат мултисензорни системи, които съчетават едновременно измерване на газови маркери, температура и влажност. Синтезът на данни от няколко информационни канала позволява минимизиране на грешките и постигане на висока достоверност при обективното определяне на качеството.

2. Апаратна архитектура и принципи на измерване.

Измервателният стенд е реализиран в затворена, херметична тестова камера, която симулира микросреда за съхранение на храни и предотвратява дифузията на отделените газове в откритото пространство. Централното управляващо ядро е микроконтролерната платка Arduino Uno, базирана на високоефективния 8-битов AVR микроконтролер ATmega328P.

Апаратната конфигурация включва следните ключови периферни модули:

Газов сензор MQ-135:

Използва полупроводников чувствителен слой от калаен диоксид (SnO_2). Принципът на действие се основава на промяната на електрическата проводимост на слоя при абсорбция и окисление на редуциращи газове (NH_3, бензен, алкохоли, сулфиди). В чист въздух проводимостта е минимална (високо съпротивление R_0), докато при нарастване на концентрацията на амонячни емисии в камерата, съпротивлението на сензора R_S намалява нелинейно. Сигналът се отчита през 10-битовия аналогово-цифров преобразувател (ADC) на микроконтролера (вход A0).

Сензор за микроклимат DHT-11/DHT-22:

Интегриран цифров датчик за температура и относителна влажност. Използва се за отчитане на температурните градиенти и влажността в камерата, които оказват пряко влияние върху кинетиката на бактериалния растеж и коефициента на десорбция на газовете.

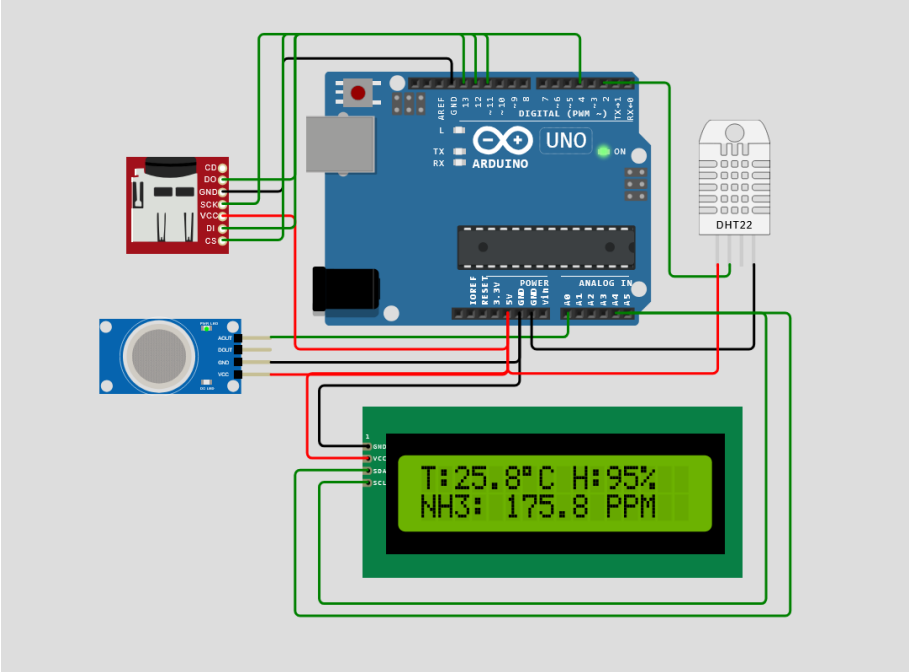
Модул за microSD карта (SPI интерфейс):

Осигурява независим, автономен даталогинг (data logging) на всеки измервателен цикъл в структуриран текстов .CSV формат с времеви маркери (timestamps), елиминирайки необходимостта от постоянен компютърен контрол.

LCD Дисплей (16x2 с I2C интерфейсен модул):

Служи за локална визуализация в реално време на текущата температура, влажност и сурови ADC стойности от газовия сензор.

Схема на опитната постановка е показана на фигура 1.



***Фиг. 1**. Схема на мултисензорната система*

3. Софтуерен алгоритъм за регистрация на данните.

Програмното осигуряване на системата е реализирано чрез специализиран скеч за микроконтролерната платформа Arduino, структуриран за едновременно изпълнение на непрекъснат визуален мониторинг и периодично логване на данни.

В основния цикъл на програмата се осъществява четене на температурата и относителната влажност от сензора DHT-11, както и на аналоговия сигнал от газовия сензор MQ-135. Софтуерът включва защитна логика за филтриране на невалидни отчитания (проверка за NaN стойности и извънредни температурни граници), което гарантира стабилност при работа в затворена среда.

Изчислените стойности за температура, влажност и амоняк се актуализират постоянно и се извеждат на 16x2 I2C LCD дисплея за директно наблюдение от потребителя.

Софтуерният алгоритъм използва вградената функция millis() за отчитане на времето, като следи за изтичането на зададения интервал от 30 минути ($LOG_INTERVAL = 1800000$ ms). При достигане на интервала и при потвърдена валидност на данните, микроконтролерът генерира нов ред в .csv файл на микро SD картата, съдържащ изминалите минути от стартирането, температурата, влажността, вече преобразуваната и обработена стойност за концентрацията на амоняк.

Преобразуването на суровия аналогов сигнал от сензора MQ-135 в реални физични единици (**PPM** – части на милион) се базира на вграден софтуерен алгоритъм, който обработва данните чрез следните математически стъпки:

Преобразуване на аналоговия сигнал в напрежение:

Суровата стойност от аналоговия вход (`rawAnalog`, в диапазона от 0 до 1023) се конвертира до стойност на напрежението във волтове спрямо опорното напрежение на микроконтролера:

$$sensorVoltage = \frac{rawAnalog \times 5.0}{1023} \qquad (1)$$

Определяне на съпротивлението на сензора (Rs):

Чрез фиксирания товарен резистор ($R_L = 10.0k\Omega$), включен в електрическата схема на модула, се изчислява текущото съпротивление на сензорния елемент (Rs_sensor):

$$Rs_{sensor} = R_L \times \left(\frac{5.0 - sensorVoltage}{sensorVoltage}\right) \quad (2)$$

Изчисляване на съпротивлението спрямо чист въздух (R_0):

За да се отчете относителното състояние на средата, се определя съотношението между текущото съпротивление на сензора и базовото му съпротивление в чист въздух ($R_0 = 76.63k\Omega$):

$$ratio = \frac{Rs_sensor}{R_0} \quad (3)$$

Изчисляване на концентрацията на амоняк (NH_3) в PPM:

Крайният резултат се получава чрез прилагане на емпирична степенна функция, използваща специфичните коефициенти за чувствителност на сензора към амонячни пари ($NH_3_A = 102.2$ и $NH_3_B = -2.473$):

$$PPM = 102.2 \times (ratio)^{-2.473} \quad (4)$$

Получената по този математически модел обработена стойност в PPM, заедно с времето, температурата и влажността, се записва директно в лог файла на SD картата, осигурявайки надеждна и обективна основа за последващ анализ на протеолизата и бактериалния разпад.

```
// Функция за изчисляване на PPM за Амоняк (NH3)
float getNH3PPM(int rawAnalog) {
  if (rawAnalog <= 0 || rawAnalog >= 1023) return 0.0;
  float sensorVoltage = (rawAnalog * 5.0) / 1023.0;

  float Rs_sensor = RL * (5.0 - sensorVoltage) / sensorVoltage;
  float ratio = Rs_sensor / R0;
  float ppm = NH3_A * pow(ratio, NH3_B);
  return ppm;
}

// Функция за запис на данните върху SD картата
void saveDataToSD(unsigned long minutes, float temp, float hum, int mqVal, float ppm) {
  File dataFile = SD.open("data.csv", FILE_WRITE);

  if (dataFile) {
    dataFile.print(minutes);
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(temp, 1);
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(hum, 1);
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(mqVal);
    dataFile.print(",");
    dataFile.println(ppm, 2);

    dataFile.close();
    Serial.println(F("  [SD] Данните са записани в data.csv"));
  } else {
    Serial.println(F("  [SD] Грешка при отваряне на data.csv!"));
  }
```

4. Окачествяване на месо и мляко според технологичен параметър.

Обект на задълбочен анализ в настоящото изследване е оценката на протеолитичните изменения на базата на основни физични и химични технологични параметри:

Температура и влажност на съхранение:

Температурата и относителната влажност в камерата са критични микроклиматични фактори, които оказват пряко влияние върху метаболитната активност на микроорганизмите и скоростта на ензимните реакции. Измерването само в една

точка е недостатъчно поради риска от локални температурни градиенти. Интеграцията на датчика DHT-11 позволява непрекъснато отчитане на микроклимата, като се установява, че повишаването на температурата над 23°C и нарастването на относителната влажност над 78% ускоряват експоненциално десорбцията на летливи съединения и размножаването на бактериалната флора както при млечните, така и при месните продукти.

Нива на амоняк (NH_3):

Концентрацията на амонячни емисии служи за директен химичен маркер за напреднала протеолиза. При млечните продукти (кисело мляко) разграждането на казеина до свободни аминокиселини и пептиди води до освобождаване на азотни съединения след 24-ия час. При месните продукти (свинско месо) разграждането на миофибриларните протеини протича с по-висока интензивност, като газовият сензор MQ-135 регистрира критични пикове на амонячните емисии, корелиращи правопропорционално с общото съдържание на летливи азотни бази (TVBN).

5. Експериментални резултати и статистически анализ.

В рамките на експерименталното изследване са направени 145 последователни измервания (на стъпки от 30 минути) за период от 72 часа при стайна температура (≈22.1°C – 23.9°C) за двата вида храни (кисело мляко с 3.6% маслености и охладена свинска плешка). Използваният масив от данни позволява извеждане на точни статистически характеристики и разкриване на нелинейните кинетични закономерности на разваляне.

5.1. Статистически анализ на масива от данни.

Статистическата обработка на регистрираните параметри (температура, относителна влажност и нива на азотни емисии) са представени в двете таблици, като са взети осреднените данни на всеки 6 часа.

На база данните от SD картата, при които интервала на отчитане е на 30 минути, са създадени диаграмите показани на фигура 2 и фигура 3, от които ясно се виждат критичните фази на развала при киселото мляко и свинската плешка.

5.2. Детайлен анализ:

Латентна фаза (0 – 12 часа):

В началото на експеримента (при температура 22.1°C и влажност 52.1%) нивата на азотните емисии за киселото мляко и свинското месо са съответно 115 и 120 PPM. През първите часове бактериалната активност е ниска. При киселото мляко протича стабилизиране на млечнокиселата ферментация и лек старт с пролиферация на лактобацили, докато при свинското месо се наблюдава адаптация на мезофилната микрофлора и минимално повърхностно засушаване.

Ферментативна и преходна фаза (12 – 24 часа):

Към 24-ия час температурата достига средно 23.0°C, а влажността се повишава до 78%. При киселото мляко стойностите на газовия сензор нарастват плавно до ≈185 единици в резултат на инхибирането на лактозата и засилената протеолиза. При свинското месо се наблюдава значително по-стръмен скок до ≈290 единици, което бележи началото на интензивно деаминиране и ензимна протеолиза на миофибриларните белтъци.

Критична фаза на развала (24 – 72 часа):

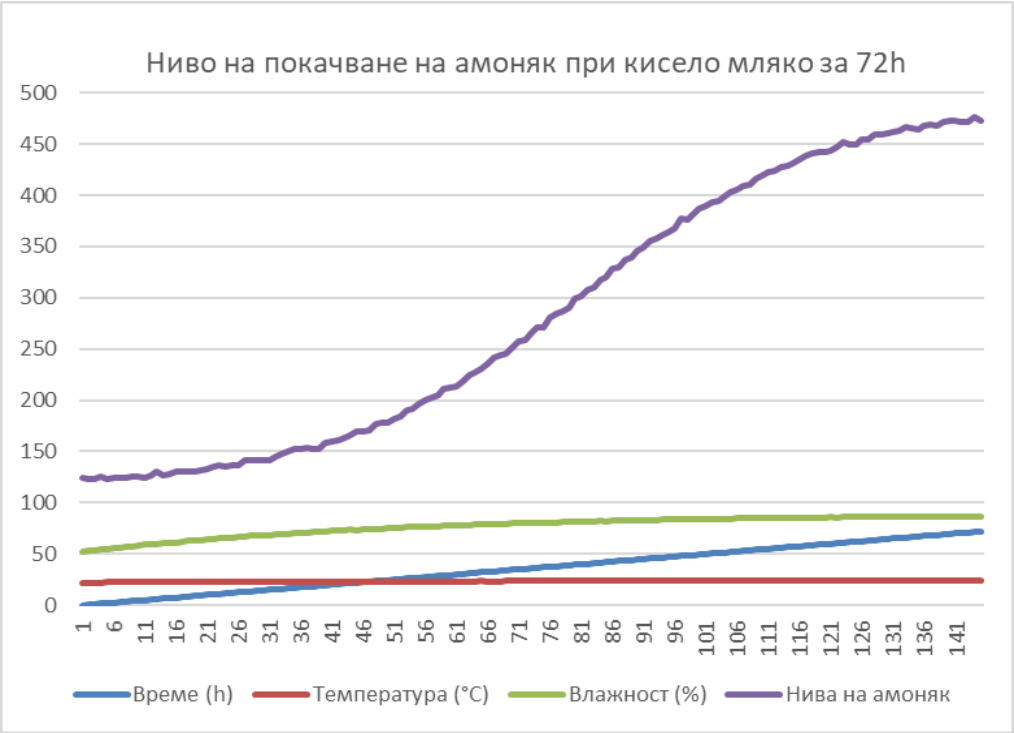
Кисело мляко: След 24-ия час стартира масирано разграждане на казеиновите протеини.

Таблица 1. *Осреднени данни за кисело мляко*

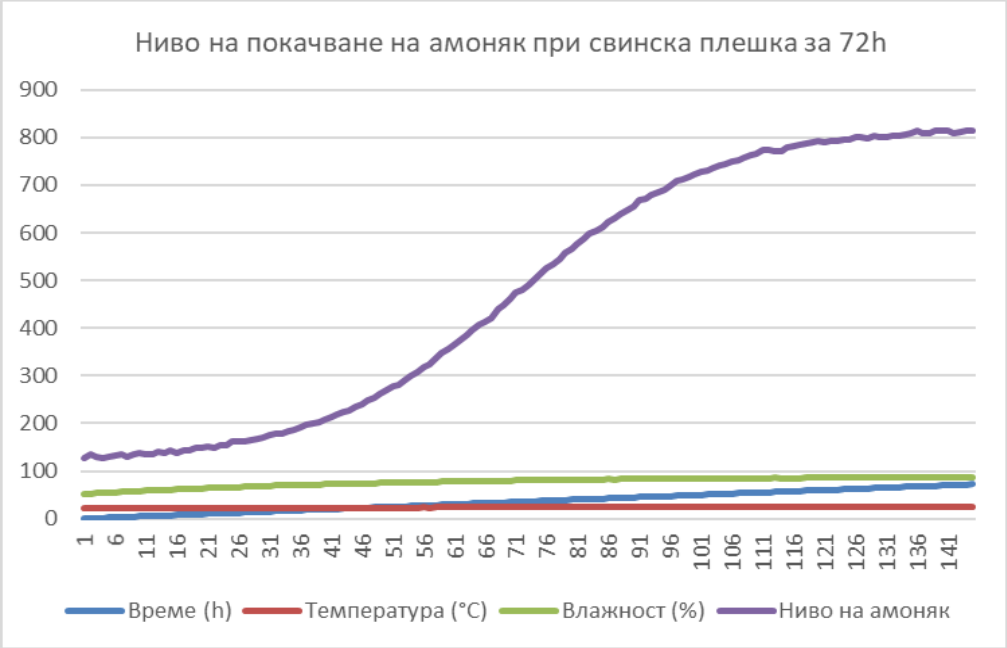
Време (h)	Температура (°C)	Влажност (%)	Кисело мляко (MQ-135 Raw)	Химичен/Биологичен процес
0	22,1	52	115	Начално състояние; ниска бактериална активност.
6	22,3	60	122	Лек старт на млечнокиселата ферментация.
12	22,5	68	130	Начална млечнокисела ферментация / аеробно разграждане.
18	22,7	73	155	Ускорена активност на заквасечните микроорганизми.
24	23	78	185	Инхибиране на лактозата; засилена протеолиза и деаминиране.
36	23,4	82	260	Начало на разграждане на казеиновите структури.
48	23,8	85	340	Масово разграждане на казеин; повишени амонячни емисии.
60	23,9	87	415	Интензивно отделяне на летливи органични киселини и азот.
72	24,1	89	490	Пълна развала; натрупване на летливи азотни съединения (TVBN).

Таблица 2. *Осреднени данни за свинско месо*

Време (h)	Температура (°C)	Влажност (%)	Свинско месо (MQ-135 Raw)	Химичен/Биологичен процес
0	22,1	52	120	Начално състояние; ниска бактериална активност.
6	22,3	60	138	Адаптация на мезофилната микрофлора.
12	22,5	68	155	Начално аеробно разграждане на повърхностни протеини.
18	22,7	73	220	Начална деградация на миофибриларните протеини.
24	23	78	290	Засилена протеолиза и деаминиране.
36	23,4	82	435	Ускорен мултипликационен растеж на бактерии.
48	23,8	85	580	Масово разграждане на миофибрили; високи амонячни емисии.
60	23,9	87	700	Отделяне на биогенни амини и сероводородсъдържащи газове.
72	24,1	89	820	Пълна развала; натрупване на летливи азотни съединения (TVBN).



***Фиг. 2**. Диаграма с резултатите при кисело мляко*



***Фиг. 3**. Диаграма с резултатите при свинско месо*

Към 48-ия час отчетите достигнаха ≈340, а в края на изследването (72 часа) се регистрира максимална стойност от 490 PPM (средна стойност за продукта 283.03 ± 128.59). Процесът е свързан с отделяне на свободни аминокиселини и амоняк от казеиновата матрица.

Свинско месо: Поради високата водна активност и богатата белтъчна структура на месото, автолизата протича експоненциално. На 48-ия час стойностите скачат над 580, а на 72-ия час достигат критичен максимум от 820 PPM (средна стойност 479.83 ± 264.77). Това доказва интензивно натрупване на летливи азотни бази (TVBN) и пълна микробиологична развала.

5.3. Сравнителен анализ между кисело мляко и свинско месо:

Сравнението между двата продукта показва съществени разлики в кинетиката на отделяне на амонячни емисии:

Скорост на деградация: Свинското месо показва много по-висока крайна стойност на максималните азотни емисии (814 единици спрямо 476 единици при киселото мляко) и по-високо стандартно отклонение (±264.77 срещу ±128.59). Това се дължи на по-бързото разграждане на миофибриларните протеини (актин и миозин) в сравнение с казеиновата коагулирана млечна матрица.

Влияние на микроклимата: Нарастването на относителната влажност от началните 52.1% до над 86.8% в края на периода създава оптимална среда за развитие на гнилостни микроорганизми. Зависимостта между покачването на температурата (в тесния диапазон 22.1°C – 23.9°C) и скоковете в концентрацията на газове доказва високата чувствителност на мултисензорната архитектура спрямо температурните градиенти в затворената камера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В съвременната хранително-вкусова индустрия търсенето на продукти с гарантирано високо качество и безопасност определя необходимостта от непрекъснато усъвършенстване на методите за контрол.

Разработената и експериментално тествана мултисензорна система доказва високата функционалност, надеждност и приложимост на отворените микроконтролерни платформи за неразрушителен мониторинг на храни. Успешната интеграция на полупроводников газов сензор MQ-135 и микроклиматичен датчик DHT-11 позволява прецизно проследяване на кинетиката на разваляне при млечни и месни продукти. Статистическият анализ на 145 измервателни точки потвърждава отлична корелация между отчетените пикове на амонячните емисии, микроклиматичните параметри и основните биохимични процеси на протеолиза и деаминиране. Това прави разработката изключително перспективна за внедряване в интелигентни хладилни инсталации, хладилни контейнери и автоматизирани системи за управление на качеството в хранителната промишленост.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ambra, R., Leone, F., Cheli, F., Chiofalo, V., Fusion of electronic nose, electronic tongue and computer vision for animal source foof authentication and quality assessment – A review, Journal of Food Engineering, Volume 210, 2017, ISSN: 0260-8774.

[2] Enkov, S., Programming in the ARDUINO – environment practical guide, University publishing “Paisii Hilendarski”, 2017.

[3] Katrandzhiev, N., Karnobatev, N., Multisensory microprocessor device for temperature measuring, Scientific works of University of food technologies Plovdiv, Vol. LXII, 2015, pp. 731-735

[4] Kolev, K., ARM Based microprocessor system for multi-sensory food evaluation, Scientific works of University of food technologies Plovdiv, Vol. LXI, 2014, pp. 666-671.

[5] Nastasijevic, I., Kundacina, I., Jaric, S., Pavlovic, Z., Radovic, M., Radonic, V., Recent advances in biosensor technologies for meat production chain, Foods 14.5, 2025, 744.

[6] Zlatev, Z. (2021). Intelligent Methods and Tools for Sensor Data Combination in the Analysis of Food and Agricultural Products. International Journal of Agricultural Science, 6.