

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-87>

УДК 004.9

ГОВОРУЩЕНКО ТЕТЯНА

Хмельницький національний університет,

<https://orcid.org/0000-0002-7942-1857>

e-mail: hovorushchenko@khmnu.edu.ua

КВАСНИЦЬКИЙ ДЕНИС

Хмельницький національний університет,

<https://orcid.org/0000-0001-8221-5598>

e-mail: denkvas2003@gmail.com

ГОВОРУЩЕНКО ОЛЬГА

Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова

<https://orcid.org/0000-0001-6583-5699>

e-mail: govorusenkoo@gmail.com

МЕТОД ДІЯЛЬНОСТІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КРЕАТИНУ В ПРОДУКТАХ ХАРЧУВАННЯ

Стаття присвячена розробці теоретичного підґрунтя для інноваційної кіберфізичної системи (КФС) визначення рівня креатину в продуктах харчування для контролю нутрієнтного стану пацієнтів із нейродегенеративними захворюваннями, зокрема спінальною м'язовою атрофією (СМА). Обґрунтовано ключову роль креатину у відновленні м'язової пам'яті та енергетичного метаболізму клітин, що є критично важливим для реабілітації хворих. Оскільки близько половини добової норми цієї речовини має надходити з їжею, виникає гостра потреба у верифікації вмісту креатину безпосередньо в продуктах харчування. Аналіз існуючих методів виявив їхню високу вартість та складність, що унеможливило експрес-контроль у побутових умовах. Визначено вимоги до нової системи, головними серед яких є інклюзивність для людей із порушеннями зору та автоматизація інтерпретації результатів. Математичне забезпечення розробленої КФС базується на законі Бугера-Ламберта-Бера та моделях цифрового колірного аналізу, що дозволяють трансформувати оптичні сигнали в кількісні показники концентрації пікрату креатиніну, утвореного в ході реакції Яффе. Запропонований метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування інтегрує фізико-хімічну підготовку рідких екстрактів продуктів за допомогою імпрегнованих тест-смужок із кібернетичним зчитуванням кольорового сигналу через бюджетні RGB-датчики. Метод передбачає автоматичну нормалізацію умов сканування, звірку даних із еталонною базою знань та виведення голосового або текстового статусу про рівень креатину в аналізованому продукті харчування. Практична значущість дослідження полягає у створенні доступного інструменту, де собівартість одного тесту є мінімальною (0,04 грн), що дозволяє проводити регулярний моніторинг усім верстам населення. Попри обмеження щодо дотримання температурного режиму, система мінімізує вплив людського фактора та забезпечує високу достовірність результатів. Створення колективної хмарної бази знань закладає основу для інтелектуального моніторингу якості харчування, що має суттєве значення для підвищення якості життя пацієнтів із системними м'язовими розладами.

Ключові слова: креатин, спінальна м'язова атрофія, кіберфізична система, метод Поппера, реакція Яффе, колірний сенсор, паперові тест-смужки, оптична детекція, хмарна база знань, мобільний застосунок.

HOVORUSHCHENKO TETANA

Khmelnytskyi National University

KVASNITSKYI DENYS

National Pirogov Memorial Medical University

HOVORUSHCHENKO OLHA

Khmelnytskyi National University

METHOD OF OPERATION OF A CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR DETERMINING THE LEVEL OF CREATINE IN FOOD PRODUCTS

The article is devoted to the development of a theoretical basis for an innovative cyber-physical system (CPS) for determining the level of creatine in food products to monitor the nutritional status of patients with neurodegenerative diseases, in particular spinal muscular atrophy (SMA). The key role of creatine in restoring muscle memory and cellular energy metabolism, which is critical for patient rehabilitation, is substantiated. Since about half of the daily requirement of this substance must come from food, there is an urgent need to verify the creatine content directly in food products. An analysis of existing methods revealed their high cost and complexity, which makes rapid testing in everyday conditions impossible. Requirements for the new system have been defined, the main ones being inclusiveness for people with visual impairments and automation of result interpretation. The mathematical support of the developed CPS is based on the Beer-Lambert-Barr law and digital color analysis models, which allow the transformation of optical signals into quantitative indicators of the concentration of creatinine picrate formed during the Jaffe reaction. The proposed method of operation of the cyber-physical system for determining the level of creatine in food products integrates the physicochemical preparation of liquid extracts of products using impregnated test strips with cybernetic reading of the color signal through budget RGB sensors. The method involves automatic normalization of scanning conditions, verification of data against a reference knowledge base, and output of voice or text status about the creatine level in the analyzed food product. The practical significance of the study lies in the creation of an affordable tool, where the cost of a single test is minimal (0.04 UAH), allowing for regular monitoring of all segments of the population. Despite restrictions on temperature control, the system minimizes the influence of the human factor and ensures high reliability of results. The creation of a collective cloud-based knowledge base lays the foundation for intelligent monitoring of nutritional quality, which is essential for improving the quality of life of patients with systemic muscle disorders.

Keywords: creatine, spinal muscular atrophy, cyber-physical system, Popper's method, Yaffe reaction, color sensor, paper test strips, optical detection, cloud knowledge base, mobile application.

Стаття надійшла до редакції / Received 17.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Говорущенко Тетяна, Квасницький Денис, Говорущенко Ольга

Вступ

Зростання захворюваності на спінальну м'язову атрофію (СМА) – генетичну патологію, що призводить до прогресуючої деградації скелетних м'язів, – є серйозним викликом для України та світу. У терапії СМА та інших нейродегенеративних розладів особливу увагу привертає креатин. Завдяки здатності відновлювати м'язову пам'ять, він у поєднанні з реабілітацією допомагає повернути втрачені функції. Крім того, креатин покращує оксигенацію організму та захищає нервову систему, що критично важливо у контексті поширення СМА. Важливо, що необхідну дозу креатину можна отримати не лише через дорогі добавки, а й шляхом збалансованого харчування.

Креатин є азотовмісною органічною кислотою, що відіграє ключову роль у метаболізмі енергії всередині нервових та м'язових клітин [1]. У м'язовій тканині він присутній як у вільній формі, так і у вигляді креатинфосфату, будучи її незамінним компонентом. У скелетній мускулатурі ця сполука забезпечує енергообмін та підтримує здатність волокон до скорочення. Завдяки стимуляції синтезу білка та сповільненню акумуляції лактату (молочної кислоти), креатин виступає критично важливим ресурсом для забезпечення сили м'язових скорочень [2].

Дослідження клінічного застосування креатину підтверджують його терапевтичну ефективність при широкому спектрі патологій [3]. Зокрема, при нейродегенеративних станах, таких як м'язова дистрофія (зокрема після коми чи тривалої іммобілізації), хвороби Паркінсона та Гентінгтона [4], креатин діє як фундаментальний регулятор енергообміну. Його застосування демонструє позитивні результати у пацієнтів з ішемією міокарда та мозку [5], діабетом, остеоартритом та депресією у підлітковому віці [6].

Ключові клінічні ефекти креатину включають:

- нейропротекція – сповільнення атрофії мозку та стимуляція вироблення допаміну;
- реабілітація – відновлення м'язової пам'яті та функціоналу в поєднанні з фізичними вправами;
- кардіопротекція – захист серцевого м'яза під час ішемічних атак;
- геріатрична підтримка – покращення ліпідного профілю, збереження щільності кісток та нарощування м'язової маси у літніх людей [7].

В організмі дорослої людини депоновано від 100 до 150 г чистого креатину, причому цей обсяг корелює із загальною м'язовою масою. Щоденний метаболізм сполуки становить приблизно 2 г, з яких лише половина (близько 1 г) синтезується організмом ендогенно [8].

Для пацієнтів із СМА критично важливим є моніторинг показників креатину, що зазвичай здійснюється в межах розширеного біохімічного аналізу крові. Основним маркером тут виступає креатинін – кінцевий продукт розпаду креатину. Оскільки рівень креатиніну в сироватці крові безпосередньо залежить від об'єму м'язової тканини та ефективності її енергообміну (референтне значення – 62-106), його динаміка дозволяє оцінити стан метаболізму, а також функціональну здатність печінки та нирок.

Попри те, що організм людини здатний самостійно синтезувати креатин (ендогенний шлях), близько половини добової потреби має надходити ззовні (екзогенний шлях) [8]. Попри широку доступність синтетичних біодобавок, пріоритетним методом підтримки оптимального рівня цієї речовини залишається збалансований раціон. Найбільша концентрація креатину спостерігається в продуктах тваринного походження, зокрема в м'ясі та рибі, проте він також присутній у молочних продуктах і деяких ягодах. Відомо, що яловичина містить 4.5 г креатину на 1 кг, свинина – 5 г на 1 кг, лосось – 4.5 г на 1 кг, тунець – 4 г на 1 кг, тріска – 3 г на 1 кг, камбала – 2 г на 1 кг [8]. Але відсутні відомості про наявність креатину в інших продуктах (наприклад, у різних м'ясних виробках).

На сьогодні існує гостра потреба у верифікації вмісту креатину в широкому спектрі харчових продуктів, що потребує впровадження сучасних методів експрес-аналізу. Актуальність досліджень щодо кількісного визначення креатину в їжі зумовлена необхідністю створення інструментів оперативного контролю якості раціону. Перспективним рішенням є розробка кіберфізичної системи (КФС), яка інтегрує фізичні процеси вимірювання з цифровою обробкою даних. Така система може базуватися на використанні оптичних датчиків (зокрема, бюджетних спектрофотометрів або колірних сенсорів). В основі роботи КФС лежатиме детекція кольорової реакції Яффе (метод Поппера), де інтенсивність забарвлення аналізованого зразка прямо пропорційна концентрації креатину. Це дозволить автоматизувати процес аналізу та зробити його доступним поза межами спеціалізованих лабораторій. Такий підхід забезпечує високу швидкість обробки інформації та створює базу для моніторингу нутрієнтного профілю продуктів у режимі реального часу. Він відкриває нові можливості для пацієнтів із СМА та фахівців із реабілітації, дозволяючи точно знати, скільки енергетичного ресурсу міститься у конкретному продукті харчування.

Огляд відомих методів та рішень

Розглянемо відомі методи та рішення щодо визначення рівня креатину в продуктах харчування.

Для кількісного визначення креатину в харчових продуктах застосовують різноманітні аналітичні підходи, серед яких найпоширенішим є метод Поппера. В його основі лежить кольорова реакція Яффе, що базується на взаємодії креатиніну з пікриновою кислотою в екстремально лужному середовищі. Результатом цієї реакції є утворення тауомера пікрату креатиніну, який надає розчину характерного оранжево-червоного забарвлення. Ступінь інтенсивності кольору, що корелює з концентрацією речовини, вимірюється за допомогою колориметричних або фотометричних методів [9]. Під час аналізу продуктів на креатин зазвичай спочатку проводять

процедуру його дегідратації (перетворення на креатинін) шляхом нагрівання в кислому середовищі, а вже потім застосовують метод Поппера.

У статті [10] запропоновано інтегровану систему для визначення концентрації креатиніну в сироватці крові людини на основі теорії реакції Яффе, яка складається з паперового чіпа та інтелектуального пристрою для виявлення.

У статті [11] розглядається розробка флуоресцентного біоаналізу креатиніну з використанням інтенсивності флуоресценції та застосуванням 3D-пересувної платформи, мікроспектрометра та лазерного діода для вимірювання різних концентрацій креатиніну в сироватці крові.

У статті [12] запропоновано новий колориметричний аналіз, заснований на ефекті Тиндаля, для недорогого, простого, специфічного, точкового та чутливого виявлення креатиніну з використанням наночастинок срібла як колоїдних нанозондів для візуальної сигналізації розсіювання світла.

У статті [13] запропоновано електромеханічну платформу «лабораторія на чіпі» для виявлення рівнів креатиніну в сироватці крові в точці догляду за допомогою колориметричного імуоферментного аналізу.

У статті [14] розроблено нову платформу для аналізу на основі портативної системи виявлення Raspberry Pi та мікрофлюїдного подвійного паперового чіпа для визначення рівня креатиніну в сечі людини.

Стаття [15] присвячена розробці колориметричної сенсорної платформи для моніторингу креатиніну на основі регуляторного впливу креатиніну на активність системи $\text{MoO}_3\text{-Cu}^{2+}$, що імітує пероксидазу.

У статті [16] продемонстровано електрохімічну систему металізації на комерційно доступній смужці електрода, надрукованої методом трафаретного друку, яка потім використовується для моніторингу концентрації креатиніну у водній суміші.

У статті [17] запропоновано новий вольтамперометричний датчик креатиніну з високою чутливістю та селективністю, який демонструє чудові результати в аналізі реальних зразків плазми.

У статті [18] запропоновано чутливий та видоспецифічний дуплексний ПЛР-аналіз у реальному часі на основі одночасної ампліфікації фрагментів м'язової креатинкінази для визначення якості м'ясних продуктів.

Стаття [19] присвячена розробці нового методу LC-MS/MS для виявлення та кількісного визначення креатиніну в режимі багаторазового моніторингу реакцій на основі методології поверхні відгуку та гідрофільний взаємодії хроматографії для оптимізації хроматографічних параметрів.

Стаття [20] присвячена розробці методу на основі агрегації функціоналізованих цистеаміном наночастинок золота для ефективного виявлення креатиніну в біологічних рідинах.

У статті [21] запропоновано економічно ефективну портативну платформу для кількісного визначення креатиніну в сироватці крові на основі високоякісного датчика камери у поєднанні з одноплатним комп'ютером Raspberry Pi.

У статті [22] описано нову концепцію, яка базується на однокроковій, простій і неферментативній системі виявлення креатиніну в харчових добавках на основі Pt-електрода з використанням елементного аналізатора.

У статті [23] описано колориметричні зонди для виявлення креатиніну в крові та сечі з використанням наночастинок металів (наприклад, з використанням наночастинок срібла, стабілізованих крохмалем, для виявлення креатиніну).

У статті [24] запропоновано неферментативний високочутливий датчик креатиніну на основі агрегованих наночастинок оксиду олова, легованого сурмою, та склоподібного вуглецевого електрода з використанням явища електрохімічного відновлення.

У статті [25] запропоновано мобільну інформаційну систему для визначення рівня креатиніну в продуктах харчування, яка забезпечує зручність, низьку вартість, швидкість, мініатюризацію та автоматизацію вимірювання концентрації креатиніну в продуктах харчування.

Аналіз сучасної наукової літератури свідчить про значний інтерес до розробки систем детекції креатиніну та креатиніну, проте виявляє низку суттєвих обмежень, які перешкоджають їхньому масовому застосуванню для моніторингу якості харчування пацієнтів (зокрема із СМА). Переважна більшість розробок орієнтована виключно на аналіз біологічних рідин людини (сироватка крові, плазма, сеча). Методи визначення вмісту креатиніну безпосередньо в продуктах харчування залишаються критично малодослідженими, за винятком поодиноких робіт щодо м'ясних продуктів [18] або спортивних добавок [22]. Використання наночастинок золота чи срібла, складних електрохімічних платформ та мікрофлюїдних систем забезпечує високу чутливість, проте суттєво здорожчує процес аналізу та обмежує термін експлуатації вимірювальних елементів. Використання таких методів, як рідинна хроматографія з мас-спектрометриєю (LC-MS/MS) [19], лазерна флуоресценція [11] або ПЛР-аналіз у реальному часі [18], потребує дороговартісного лабораторного устаткування та висококваліфікованого персоналу, що унеможливує експрес-контроль у побутових умовах. Хоча існують спроби створення портативних пристроїв на базі Raspberry Pi [14, 21], вони не адаптовані для роботи з твердими чи напіврідкими зразками харчових продуктів і не враховують специфіку підготовки таких проб. Тому, метою даного дослідження є подолання зазначених недоліків шляхом розробки інноваційної кіберфізичної системи (КФС) для експрес-визначення рівня креатиніну в продуктах харчування. На відміну від існуючих рішень, запропонована система базуватиметься на: використанні бюджетних оптичних датчиків (спектрофотометрів або кольорних сенсорів) для розпізнавання результатів класичної реакції Яффе, адаптації методу Поппера для аналізу широкого спектру нутрієнтних джерел (м'ясо, риба, молочні продукти), інтеграції вимірювального модуля в єдиний кіберфізичний контур для автоматичної обробки даних та формування рекомендацій щодо раціону. Такий підхід дозволить створити недорогий, надійний та доступний інструмент для

корекції метаболічних станів у пацієнтів із нейроп'язовими захворюваннями, забезпечуючи перехід від лабораторних досліджень до практичного застосування в точці споживання їжі.

Формування вимог предметної галузі

Проведемо формування вимог предметної галузі щодо виявлення креатину методом Поппера на базі кольорової реакції Яффе.

Процедура реалізації методу охоплює наступні етапи:

1) етап підготовки – отримання рідкого екстракту зразка (відвару або бульйону аналізованого продукту харчування) та підготовка робочих реагентів (1%-ий водний розчин пікринової кислоти, 10%-ий розчин гідроксиду натрію) і киплячої водяної бані;

2) реакційна фаза – у ємність із 2 мл досліджуваного зразка (відвару або бульйону) послідовно внести 3 краплі розчину пікринової кислоти та 5 крапель лужного розчину гідроксиду натрію, змішати вміст посуду;

3) термічна стабілізація – інкубація суміші на киплячій водяній бані протягом 15 хвилин для завершення хімічного перетворення;

4) аналітичний висновок – візуальна або інструментальна оцінка забарвлення. Поява оранжевого спектра свідчить про наявність креатину, тоді як збереження блідо-жовтого кольору вказує на його відсутність або концентрацію нижче порогу чутливості.

Хоча класичний метод Поппера орієнтований на лабораторні умови, його адаптація для побутового використання можлива завдяки створенню портативних діагностичних засобів. Оптимальним інструментом є паперові тест-смужки, попередньо імпрегновані сумішшю 1%-го розчину пікринової кислоти та 10%-го розчину натрій гідроксиду (у співвідношенні 3:5).

Застосування таких тест-систем максимально спрощує алгоритм аналізу для кінцевого користувача:

1) розміщення смужки в ємності з рідким екстрактом продукту (бульйоном або відваром аналізованого продукту харчування);

2) термічна експозиція на водяній бані протягом 15 хвилин;

3) колориметрична оцінка результату за зміною забарвлення.

Така методика є інклюзивною, оскільки її легко реалізувати людям із обмеженими фізичними можливостями. Крім того, економічна ефективність рішення є надзвичайно високою – собівартість однієї смужки (2x5 см) становить лише 0,04 грн, що робить регулярний моніторинг доступним для всіх верств населення.

Ключовою проблемою при використанні традиційного методу є суб'єктивність візуальної оцінки результатів. Шкала для оцінювання кольору аналізованого зразка з метою встановлення вмісту та рівня креатину в досліджуваному продукті харчування була розроблена авторами у [25] – Рис. 1.

Колір 0 – Відсутність креатину	Колір 1 – Наявність низького рівня креатину	Колір 2 – Наявність середнього рівня креатину	Колір 3 – Наявність високого рівня креатину
--------------------------------	---	---	---

Рис. 1. Шкала для оцінювання кольору аналізованого зразка з метою встановлення вмісту та рівня креатину в досліджуваному продукті харчування [25]

Коректна інтерпретація вмісту креатину залежить від здатності користувача точно розрізнити відтінки та інтенсивність кольорової реакції. Проте для багатьох пацієнтів це стає перешкодою через порушення зору або кольоросприйняття (зокрема, різні форми дальтонізму). Щоб усунути людський фактор та забезпечити точність вимірювань, і розробляється кіберфізична система, яка автоматизує процес розпізнавання кольору та надає об'єктивні дані про концентрацію речовини. Використання оптичних датчиків у складі КФС дозволяє цифровізувати колірний сигнал, перетворюючи його на точні кількісні показники концентрації. Система виконає роль високоточного аналізатора, що робить діагностику доступною для людей із будь-яким станом зору, усуваючи ризик помилкового трактування. КФС не просто фіксуватиме колір, а автоматично формуватиме об'єктивний висновок про нутрієнтну цінність продукту, забезпечуючи надійний зворотний зв'язок для користувача.

Математична модель та метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування

Математична модель визначення рівня креатину в продуктах харчування базується на фізичному законі поглинання світла та хімічній стехіометрії реакції Яффе. Оскільки ми використовуватимемо оптичні датчики (колірні сенсори або бюджетні спектрофотометри), модель повинна пов'язувати цифрові значення кольору (наприклад, інтенсивність у каналі RGB або оптичну щільність) з концентрацією креатину.

Фундаментом моделі є закон, згідно з яким оптична щільність розчину (A) прямо пропорційна концентрації забарвленої речовини (C):

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot C, \quad (1)$$

де A – оптична щільність (абсорбція), ε – молярний коефіцієнт поглинання пікрату креатиніну (константа), l – товщина шару (відстань від джерела світла до датчика), C – концентрація креатиніну (у якій перетворився креатин після нагрівання).

Оскільки бюджетні сенсори видають значення інтенсивності світла (I), модель трансформується. Для реакції Яффе найбільш інформативним є синьо-зелений спектр (поглинання), оскільки сам розчин стає оранжево-червоним. Використовуємо інтенсивність каналу G (зелений) або B (синій), які найбільше змінюються при появі оранжевого кольору:

$$C = -k \cdot \ln \left(\frac{I_{sample}}{I_{blank}} \right), \quad (2)$$

де k – емпіричний коефіцієнт масштабування, I_{sample} – інтенсивність світла, що пройшло крізь аналізований зразок, I_{blank} – інтенсивність світла для «холостої» пробт (блідо-жовта смужка без креатину).

Для практичної реалізації в системі використовується лінійна апроксимація після калібрування:

$$C_{creatin} = \alpha \cdot (X_{norm}) + \beta, \quad (3)$$

де X_{norm} – нормалізований колірний показник; при використанні простору RGB зручно використовувати координату R (червоний) відносно загальної яскравості: $X = \frac{R}{R+G+B}$; α – чутливість системи (визначається при калібруванні датчика еталонними значеннями кольору – Рис. 1); β – зміщення (враховує власне забарвлення бульйону та реактивів).

Оскільки необхідною є термічна експозиція на водяній бані протягом 15 хвилин, то інтенсивність кольору також є функцією часу (t) та температури (T).

Тоді повна модель набуває вигляду:

$$C(I, t, T) = \frac{I_{measured}}{f(t) \cdot g(T) \cdot \epsilon \cdot l'} \quad (4)$$

де $f(t)$ – кінетика утворення пікрату креатиніну (зазвичай виходить на плао після 10-12 хвилин), $g(T)$ – температурний коефіцієнт (стабілізується при 100°C)

Математичне забезпечення розробленої системи ґрунтується на законі Бугера-Ламберта-Бера та адаптованих моделях цифрового колірної аналізу, що дозволяють трансформувати оптичні сигнали у кількісні показники. Створена модель пов'язує інтенсивність поглинання світла в синьо-зеленому спектрі з концентрацією пікрату креатиніну, утвореного в ході реакції Яффе. Такий підхід забезпечує об'єктивність вимірювань та створює аналітичний фундамент для перетворення суб'єктивного візуального спостереження на точний цифровий висновок у межах єдиного обчислювального контуру.

Тоді *метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування* складається з таких кроків:

1) фізико-хімічна підготовка – взаємодія користувача з об'єктом дослідження та підготовка «сигналу» для сенсорів: користувач готує рідкий екстракт аналізованого продукту (відвар або бульйон), що необхідно для переведення креатину у розчинну форму; використовує паперову тест-смужку, імпрегнованої реагентами Яффе (пікринова кислота + NaOH у пропорції 3:5); розміщує смужку у зразок та виконує термічну обробку (на водяній бані протягом 15 хв) для фізико-хімічного перетворення креатину в оранжевий пікрат креатиніну;

2) введення у мобільний застосунок назви аналізованого продукту харчування;

3) кібернетичне зчитування та оцифрування – фізичні властивості (колір) трансформуються у цифровий формат:

3.1) оптичне сканування – КФС активує джерело стабілізованого світла та колірний сенсор (наприклад, спектрофотометричний модуль або RGB-датчик);

3.2) нормалізація зовнішніх умов – система автоматично враховує рівень зовнішнього освітлення та проводить «корекцію нуля» за незабарвленою ділянкою паперу;

3.3) зчитування спектральних характеристик – датчик фіксує інтенсивність світла у визначених діапазонах. Для реакції Яффе критичним є поглинання в синьо-зеленому спектрі (490–510 нм);

4) обробка та аналіз даних:

4.1) звірка отриманих даних з еталонними даними (Рис. 1), які містяться у базі знань, з метою встановлення вмісту та рівня креатину в досліджуваному продукті харчування;

4.2) якщо паперова тестова смужка має колір 0 зі шкали для оцінювання кольору аналізованого зразка (Рис. 1), то креатин в досліджуваному продукті відсутній;

4.3) інакше якщо паперова тестова смужка має колір 1 зі шкали для оцінювання кольору аналізованого зразка (Рис. 1), то креатин в досліджуваному продукті наявний, і рівень креатину – низький;

4.4) інакше якщо паперова тестова смужка має колір 2 зі шкали для оцінювання кольору аналізованого зразка (Рис. 1), то креатин в досліджуваному продукті наявний, і рівень креатину – середній;

4.5) інакше якщо паперова тестова смужка має колір 3 зі шкали для оцінювання кольору аналізованого зразка (Рис. 1), то креатин в досліджуваному продукті наявний, і рівень креатину – високий;

4.6) інакше наявні проблеми із розпізнаванням кольору, слід повторити сканування тестової смужки;

5) видача результату та підтримка прийняття рішень:

5.1) система виводить на екран мобільного застосунку текстовий або голосовий статус за вибором користувача (наприклад: «Рівень креатину – високий. Рекомендовано для споживання»);

5.2) збереження результату в загальнодоступній усім користувачам системи хмарі для фіксації рівня креатину в тому чи іншому продукті харчування з метою подальшого використання готових результатів користувачами системи.

Запропонований метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування відзначається високою інклюзивністю та економічною доступністю, оскільки він усуває суб'єктивізм людського фактора при оцінюванні складних кольорових реакцій. Використання бюджетних оптичних сенсорів у поєднанні з мобільним застосунком дозволяє людям із порушеннями зору або дальтонізмом отримувати точні дані про нутрієнтний склад їжі без необхідності звернення до спеціалізованих лабораторій. Оцифрування результатів та їх збереження у хмарному середовищі створює унікальну базу знань про фактичний вміст креатину в продуктах різних виробників, що трансформує процес контролю дієти з поодинокого вимірювання на колективну інтелектуальну підтримку пацієнтів із нейрому'язовими захворюваннями.

Водночас метод має певні обмеження, пов'язані з необхідністю суворого дотримання температурного режиму та тривалості термічної обробки, оскільки відхилення від 15-хвилинного нагрівання може викривити інтенсивність забарвлення. Попри високу чутливість реакції Яффе, точність системи залежить від якості підготовки рідкого екстракту та чистоти паперових смужок, що вимагає від користувача базової ретельності на фізико-хімічному етапі. Також ефективність методу обмежена наявними еталонними даними в базі знань, тому для нових або комбінованих продуктів харчування система може вимагати попереднього калібрування або повторного сканування для уникнення похибок, спричинених природною пігментацією деяких інгредієнтів.

Висновки

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано високу актуальність розробки засобів контролю нутрієнтного стану пацієнтів із нейродегенеративними захворюваннями, зокрема спінальною му'язовою атрофією. Встановлено, що креатин відіграє критичну роль у відновленні му'язового функціоналу та енергетичного обміну, проте складність моніторингу його вмісту в продуктах харчування поза межами спеціалізованих лабораторій створює значний бар'єр для ефективної реабілітації. Це зумовило необхідність пошуку нових технологічних рішень, які б поєднували доступність хімічного аналізу з точністю сучасних цифрових систем.

Аналіз існуючих методів виявлення креатину та креатиніну показав, що більшість сучасних рішень орієнтовані на клінічну діагностику біологічних рідин і базуються на використанні дороговартісного обладнання або складних сенсорних платформ. Виявлені недоліки відомих підходів, такі як вузька спрямованість на лабораторні умови та висока технологічна складність, підтвердили доцільність розробки інклюзивної системи. Це дозволило сформулювати ключові вимоги предметної галузі, серед яких пріоритетними стали мінімізація вартості аналізу, простота експлуатації в домашніх умовах та автоматизація інтерпретації результатів.

Математичне забезпечення розробленої системи ґрунтується на законі Бугера-Ламберта-Бера та адаптованих моделях цифрового кольорового аналізу, що дозволяють трансформувати оптичні сигнали у кількісні показники. Створена модель пов'язує інтенсивність поглинання світла в синьо-зеленому спектрі з концентрацією пікрату креатиніну, утвореного в ході реакції Яффе. Такий підхід забезпечує об'єктивність вимірювань та створює аналітичний фундамент для перетворення суб'єктивного візуального спостереження на точний цифровий висновок у межах єдиного обчислювального контуру.

Розроблений метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування інтегрує фізико-хімічні процедури підготовки зразків із кібернетичними процесами зчитування та інтелектуальної обробки даних. Алгоритм роботи системи охоплює повний цикл від термічної активації паперових тест-смужок до хмарного збереження результатів, що забезпечує користувачу автоматизовану підтримку прийняття рішень. Важливою особливістю методу є багаторівнева обробка кольорних характеристик, яка дозволяє чітко диференціювати рівні вмісту креатину та надавати пацієнту зрозумілий вербальний або текстовий статус.

Водночас метод має певні обмеження, пов'язані з необхідністю суворого дотримання температурного режиму та тривалості термічної обробки. Попри високу чутливість реакції Яффе, точність системи залежить від якості підготовки рідкого екстракту та чистоти паперових смужок, що вимагає від користувача базової ретельності на фізико-хімічному етапі.

Загалом розроблювана кіберфізична система відкриває нові можливості для персоналізованого контролю дієтоterapiї, роблячи процес тестування доступним для людей із порушеннями зору та обмеженими фінансовими ресурсами. Використання бюджетних компонентів у поєднанні з потужним математичним і програмним апаратом нівелює людський фактор і підвищує достовірність результатів. Створення колективної бази знань у хмарному середовищі закладає основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем моніторингу якості харчування, що має суттєве значення для підвищення якості життя пацієнтів із системними му'язовими розладами.

Література

1. PubChem Creatine (Compound). URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Creatine#section=3D-Conformer>.
2. Effects of 12-Week Plyometric Training Combined with Creatine Supplementation on Fatigue Substances, Muscle Damage and Muscle Activity in Sprinter / Q. yan et al. *The Korea Journal of Sport*. 2022. Vol. 20, no. 3. P. 853–864. URL: <https://doi.org/10.46669/kss.2022.20.3.074>.
3. International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine / R. B. Kreider et al. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2017. Vol. 14, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12970-017-0173-z>.
4. Bender A., Klopstock T. Creatine for neuroprotection in neurodegenerative disease: end of story? *Amino Acids*. 2016. Vol. 48, no. 8. P. 1929–1940. URL: <https://doi.org/10.1007/s00726-015-2165-0>.
5. Potential of creatine or phosphocreatine supplementation in cerebrovascular disease and in ischemic heart disease / M. Balestrino et al. *Amino Acids*. 2016. Vol. 48, no. 8. P. 1955–1967. URL: <https://doi.org/10.1007/s00726-016-2173-8>.
6. Cognitive effects of creatine monohydrate adjunctive therapy in patients with bipolar depression: Results from a randomized, double-blind, placebo-controlled trial / R. A. Toniolo et al. *Journal of Affective Disorders*. 2017. Vol. 224. P. 69–75. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jad.2016.11.029>.
7. Effects of creatine supplementation on brain in the healthy population / T. Swatko et al. *Journal of Education, Health and Sport*. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 160–165. URL: <https://doi.org/10.12775/jehs.2023.13.04.017>.
8. Which type of foods are rich in creatine? URL: <https://www.quora.com/Which-type-of-foods-are-rich-in-creatine>.
9. Toora B., Rajagopal G. Measurement of creatinine by Jaffe's reaction--determination of concentration of sodium hydroxide required for maximum color development in standard, urine and protein free filtrate of serum. *Indian Journal of Experimental Biology*. 2022. Vol. 40. Issue 3. Pp. 352-354.
10. Rapid Paper-Based System for Human Serum Creatinine Detection / L.-M. Fu et al. *Inventions*. 2018. Vol. 3, no. 2. P. 34. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions3020034>.
11. Chen C.-M., Tsai Y.-L. Creatinine-Detecting Laser Diode-Induced Fluorescence Detection System. *IEEE Sensors Journal*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3196629>.
12. Tyndall-effect-based colorimetric assay with colloidal silver nanoparticles for quantitative point-of-care detection of creatinine using a laser pointer pen and a smartphone / K. Yuan et al. *RSC Advances*. 2022. Vol. 12, no. 36. P. 23379–23386. URL: <https://doi.org/10.1039/d2ra03598g>.
13. An Electromechanical Lab-on-a-Chip Platform for Colorimetric Detection of Serum Creatinine / B. Karakuzu et al. *ACS Omega*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03354>.
14. Microfluidic Sliding Paper-Based Device for Point-of-Care Determination of Albumin-to-Creatine Ratio in Human Urine / S.-J. Chen et al. *Biosensors*. 2022. Vol. 12, no. 7. P. 496. URL: <https://doi.org/10.3390/bios12070496>.
15. Colorimetric detection of creatinine based on specifically modulating the peroxidase-mimicking activity of Cu-Fenton system / L. Liang et al. *Biosensors and Bioelectronics*. 2022. Vol. 206. P. 114121. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114121>.
16. Electrochemical metallization process on screen-printed electrode for creatinine monitoring application / M. A. A. Khushaini et al. *IEEE Sensors Journal*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3164105>.
17. Alizadeh T., Mousavi Z. Molecularly imprinted polymer specific to creatinine complex with copper(II) ions for voltammetric determination of creatinine. *Microchimica Acta*. 2022. Vol. 189, no. 10. URL: <https://doi.org/10.1007/s00604-022-05470-8>.
18. Detection of meat from horse, donkey and their hybrids (mule/hinny) by duplex real-time fluorescent PCR / D. Wang et al. *PLOS ONE*. 2020. Vol. 15, no. 12. P. e0237077. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237077>.
19. Hydrophilic interaction chromatography coupled to tandem mass spectrometry as a method for simultaneous determination of guanidinoacetate and creatine / P. Jovanov et al. *Analytica Chimica Acta*. 2018. Vol. 1028. P. 96–103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.03.038>.
20. Aggregation of cysteamine-capped gold nanoparticles in presence of ATP as an analytical tool for rapid detection of creatine kinase (CK-MM) / A. K. Sharma et al. *Analytica Chimica Acta*. 2018. Vol. 1024. P. 161–168. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.03.027>.
21. Portable Chemiluminescence Detection Platform and Its Application in Creatinine Detection / S. Dudala et al. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22, no. 7. P. 7177–7184. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3151694>.
22. Surucu O., Abaci S. Non-enzymatic and Electrochemical Detection of Creatine in Food Supplements. *Electrocatalysis*. 2022. Vol. 13, no. 2. P. 195–209. URL: <https://doi.org/10.1007/s12678-022-00710-0>.
23. Lertvachirapaiboon C., Baba A., Shinbo K., Kato K.. Colorimetric probe based on destabilization of silver nanoparticles from polysaccharide matrix for creatinine detection. Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2020). Virtual, Tokyo, 13-17 September 2020. Volume 2020-September. Pp 35 – 37.
24. Rahman M. M., Ahmed J., Asiri A. M. Development of Creatine sensor based on antimony-doped tin oxide (ATO) nanoparticles. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017. Vol. 242. P. 167–175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.11.053>.

25. Hovorushchenko T., Kvasnitskyi D., Hovorushchenko O., Zasornova I., Boyarchuk A. Mobile Information System for Determining the Level of Creatine in Food Products. CEUR-WS. 2023. Vol. 3373. Pp. 174-184.

References

1. PubChem Creatine (Compound). URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Creatine#section=3D-Conformer>.
2. Effects of 12-Week Plyometric Training Combined with Creatine Supplementation on Fatigue Substances, Muscle Damage and Muscle Activity in Sprinter / Q. yan et al. *The Korea Journal of Sport*. 2022. Vol. 20, no. 3. P. 853–864.
3. International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine / R. B. Kreider et al. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2017. Vol. 14, no. 1.
4. Bender A., Klopstock T. Creatine for neuroprotection in neurodegenerative disease: end of story? *Amino Acids*. 2016. Vol. 48, no. 8. P. 1929–1940.
5. Potential of creatine or phosphocreatine supplementation in cerebrovascular disease and in ischemic heart disease / M. Balestrino et al. *Amino Acids*. 2016. Vol. 48, no. 8. P. 1955–1967.
6. Cognitive effects of creatine monohydrate adjunctive therapy in patients with bipolar depression: Results from a randomized, double-blind, placebo-controlled trial / R. A. Toniolo et al. *Journal of Affective Disorders*. 2017. Vol. 224. P. 69–75.
7. Effects of creatine supplementation on brain in the healthy population / T. Swatko et al. *Journal of Education, Health and Sport*. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 160–165.
8. Which type of foods are rich in creatine? URL: <https://www.quora.com/Which-type-of-foods-are-rich-in-creatine>.
9. Toora B., Rajagopal G. Measurement of creatinine by Jaffe's reaction--determination of concentration of sodium hydroxide required for maximum color development in standard, urine and protein free filtrate of serum. *Indian Journal of Experimental Biology*. 2022. Vol. 40. Issue 3. Pp. 352-354.
10. Rapid Paper-Based System for Human Serum Creatinine Detection / L.-M. Fu et al. *Inventions*. 2018. Vol. 3, no. 2. P. 34.
11. Chen C.-M., Tsai Y.-L. Creatinine-Detecting Laser Diode-Induced Fluorescence Detection System. *IEEE Sensors Journal*. 2022. P. 1.
12. Tyndall-effect-based colorimetric assay with colloidal silver nanoparticles for quantitative point-of-care detection of creatinine using a laser pointer pen and a smartphone / K. Yuan et al. *RSC Advances*. 2022. Vol. 12, no. 36. P. 23379–23386.
13. An Electromechanical Lab-on-a-Chip Platform for Colorimetric Detection of Serum Creatinine / B. Karakuzu et al. *ACS Omega*. 2022.
14. Microfluidic Sliding Paper-Based Device for Point-of-Care Determination of Albumin-to-Creatine Ratio in Human Urine / S.-J. Chen et al. *Biosensors*. 2022. Vol. 12, no. 7. P. 496.
15. Colorimetric detection of creatinine based on specifically modulating the peroxidase-mimicking activity of Cu-Fenton system / L. Liang et al. *Biosensors and Bioelectronics*. 2022. Vol. 206. P. 114121.
16. Electrochemical metallization process on screen-printed electrode for creatinine monitoring application / M. A. A. Khushaini et al. *IEEE Sensors Journal*. 2022. P. 1.
17. Alizadeh T., Mousavi Z. Molecularly imprinted polymer specific to creatinine complex with copper(II) ions for voltammetric determination of creatinine. *Microchimica Acta*. 2022. Vol. 189, no. 10.
18. Detection of meat from horse, donkey and their hybrids (mule/hinny) by duplex real-time fluorescent PCR / D. Wang et al. *PLOS ONE*. 2020. Vol. 15, no. 12. P. e0237077.
19. Hydrophilic interaction chromatography coupled to tandem mass spectrometry as a method for simultaneous determination of guanidinoacetate and creatine / P. Jovanov et al. *Analytica Chimica Acta*. 2018. Vol. 1028. P. 96–103.
20. Aggregation of cysteamine-capped gold nanoparticles in presence of ATP as an analytical tool for rapid detection of creatine kinase (CK-MM) / A. K. Sharma et al. *Analytica Chimica Acta*. 2018. Vol. 1024. P. 161–168.
21. Portable Chemiluminescence Detection Platform and Its Application in Creatinine Detection / S. Dudala et al. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22, no. 7. P. 7177–7184.
22. Surucu O., Abaci S. Non-enzymatic and Electrochemical Detection of Creatine in Food Supplements. *Electrocatalysis*. 2022. Vol. 13, no. 2. P. 195–209.
23. Lertvachirapaiboon C., Baba A., Shinbo K., Kato K.. Colorimetric probe based on destabilization of silver nanoparticles from polysaccharide matrix for creatinine detection. Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2020). Virtual, Tokyo, 13-17 September 2020. Volume 2020-September, Pp. 35 – 37.
24. Rahman M. M., Ahmed J., Asiri A. M. Development of Creatine sensor based on antimony-doped tin oxide (ATO) nanoparticles. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017. Vol. 242. P. 167–175.
25. Hovorushchenko T., Kvasnitskyi D., Hovorushchenko O., Zasornova I., Boyarchuk A. Mobile Information System for Determining the Level of Creatine in Food Products. CEUR-WS. 2023. Vol. 3373. Pp. 174-184.