

ЭКСПРЕСС-ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОРАЗОВОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Тарасов, tarasovav@usue.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7642-6532>

Н.В. Заворохина[✉], zavornv@usue.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5458-8565>

Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Внесение антиоксидантов в пищевые системы с целью увеличения их функционального действия, повышения срока хранения создает потребность их количественного определения. Существующие методы лабораторного определения АОА в кондитерских изделиях, использующие приготовление коллоидных растворов растворением при контролируемой температуре в качестве этапа подготовки твердофазных образцов, решают большой спектр аналитических задач, но характеризуются высокой трудоемкостью. Статья посвящена разработке одноразовой потенциометрической сенсорной системы (ПСС) и ее применению в оценке антиоксидантной активности (АОА) твердофазных пищевых систем на примере кондитерских изделий (желейных, пастильных, сбивных). Толстопленочные электроды ПСС изготавливали с применением трафаретной печати; углеродсодержащий электрод, используемый в качестве индикаторного электрода, модифицировали многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ), серебросодержащий электрод, модифицированный смешанным осадком и стабилизированный Нафионом, служил электродом сравнения. АОА оценивали потенциометрическим методом с использованием медиаторной системы гексацианоферратов калия ($K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$). Представлено схематическое изображение процедуры оценки АОА твердофазных пищевых образцов с использованием ПСС и циклические вольтамперограммы, зарегистрированные на толстопленочном углеродсодержащем электроде при скорости 50 мВ/с в натрий-фосфатном буфере pH 7,4, содержащем 1 ммоль/дм³ $K_3[Fe(CN)_6]$ и 1 ммоль/дм³ $K_4[Fe(CN)_6]$ и зависимость потенциала МУНТ (1 % масс.)/С/ПЭТ в натрий-фосфатном буфере pH 7,4, содержащем различные соотношения $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$. Результаты анализа кондитерских изделий, полученные с использованием ПСС, сопоставимы с результатами, полученными с использованием коммерческих электродов. Результаты анализа срезов кондитерских изделий, полученные с использованием ПСС в условиях нагрузки (4,8 кПа), коррелируют с результатами анализа их коллоидных растворов. Предложенная ПСС является одноразовой, дает возможность анализировать твердофазные образцы в режиме реального времени (*in situ*), демонстрирует высокую аналитическую эффективность и может быть изготовлена в виде экспресс-тестов для дальнейшего использования при определении АОА кондитерских изделий. В комплектации с потенциометрическим анализатором портативного типа предложенная ПСС может использоваться во внелабораторных условиях.

Ключевые слова: антиоксидантная активность, пищевая система, потенциометрическая сенсорная система, кондитерские изделия

Для цитирования: Тарасов А.В., Заворохина Н.В. Экспресс-определение антиоксидантной активности кондитерских изделий с использованием одноразовой потенциометрической сенсорной системы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2023. Т. 11, № 2. С. 93–102. DOI: 10.14529/food230211

Original article
DOI: 10.14529/food230211

EXPRESS DETERMINATION OF ANTIOXIDANT ACTIVITY OF CONFECTIONERY PRODUCTS USING A DISPOSABLE POTENTIOMETRIC SENSOR SYSTEM

A.V. Tarasov, tarasovav@usue.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7642-6532>
N.V. Zavorokhina[✉], zavornv@usue.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5458-8565>
Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The introduction of antioxidants into food systems in order to increase their functional effect, increase the shelf life creates the need for their quantitative determination. Existing methods of laboratory determination of AOA in confectionery products, using the preparation of colloidal solutions by dissolution at a controlled temperature as a stage in the preparation of solid-phase samples, solve a wide range of analytical tasks, but are characterized by high labor intensity. The article is devoted to the development of a single-use potentiometric sensor system (PSS) and its application in assessing the antioxidant activity (AOA) of solid-phase food systems on the example of confectionery products (jelly, pastille, whipped). Thick-film PSS electrodes were manufactured using screen printing; a carbon-containing electrode used as an indicator electrode was modified with multilayer carbon nanotubes (MNT), a silver-containing electrode modified with mixed sediment and stabilized with Naphion served as a reference electrode. AOA was evaluated by a potentiometric method using a mediator system of potassium hexacyanoferrates ($K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$). A schematic representation of the AOA evaluation procedure of solid-phase food samples using PSS and cyclic voltammograms recorded on a thick-film carbon-containing electrode at a speed of 50 mV/s in a sodium-phosphate buffer pH 7.4 containing 1 mmol/dm³ $K_3[Fe(CN)_6]$ and 1 mmol/dm³ $K_4[Fe(CN)_6]$ and the dependence of the MNT potential (1 % wt.)/C/PET in a sodium-phosphate buffer pH 7.4 containing a different ratio of $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$. The results of the analysis of confectionery products obtained using PSS are comparable to the results obtained using commercial electrodes. The results of the analysis of sections of confectionery products obtained using PSS under load conditions (4.8 kPa) correlate with the results of the analysis of their colloidal solutions. The proposed PSS is disposable, makes it possible to analyze solid-phase samples in real time (in situ), demonstrates high analytical efficiency and can be made in the form of express tests for further use in determining the AOA of confectionery products. In combination with a portable type potentiometric analyzer, the proposed PSS can be used in non-laboratory conditions.

Keywords: antioxidant activity, food system, potentiometric sensor system, confectionery

For citation: Tarasov A.V., Zavorokhina N.V. Express determination of antioxidant activity of confectionery products using a disposable potentiometric sensor system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 93–102. (In Russ.) DOI: 10.14529/food230211

Введение

Использование БАВ с высоким антиоксидантным эффектом при моделировании ингредиентного состава пищевого продукта является наиболее простой возможностью повысить его функциональность для достижения кардио- и гепатопротекторных свойств, снижения оксидативного стресса организма человека при техногенных и иных нагрузках, повышения иммунитета, увеличения срока хранения и антиокислительных свойств пи-

щевого продукта. При этом введение антиоксидантов должно быть контролируемым с возможностью их количественного определения. Сегодня существует множество методов количественного определения антиоксидантной активности – химические, физико-химические методы, в том числе спектроскопические, электрохимические методы, амперометрические, кулонометрические, вольтамперометрические и потенциометрические. Потенциометрический метод позволяет ре-

шить ряд проблем, связанных с определением АОА – он наиболее простой и информативный из всех вышеперечисленных, не требует построения градуировочной шкалы и градуировки приборов. Особую трудность представляет определение АОА в полутвердых и твердофазных пищевых системах.

Потенциометрический метод с использованием медиаторной системы гексацианоферратов калия ($K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$) был предложен для анализа жидких и твердофазных образцов медиаторной системы гексацианоферратов калия в 2002 и 2010 годах. Исследования последующих лет свидетельствуют об успешном применении метода в пищевых [1–5], косметических [6], фармацевтических [7], и медицинских [8, 9] приложениях. Однако многократное использование в анализе коммерческих электродов требует их обслуживания, что затрудняет дальнейшее внедрение метода в промышленную и медицинскую практику. В частности, индикаторный платиновый электрод нуждается в предварительной очистке поверхности [10], а хлорсеребряный электрод сравнения требует периодического заполнения раствором внутреннего электролита и проверки потенциала. Таким образом, разработка не требующих обслуживания одноразовых электродов, предназначенных для потенциометрического определения АОА, является актуальной исследовательской задачей и направлена на сокращение разрыва между лабораторным и внелабораторным анализом.

В работах [11, 12] был описан планарный твердотельный электрод на основе хлорида и феррицианида серебра, обладающий стабильным потенциалом в среде с переменным содержанием $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$, что позволило использовать его в качестве электрода сравнения в условиях потенциометрического определения АОА. Разработанный электрод сравнения в комбинации с планарным платиновым электродом служил потенциометрической сенсорной системой (ПСС), эффективность которой была подтверждена в анализе яблочных соков, биологических жидкостей [11], срезов фруктов и овощей [13]. Однако многократное применение индикаторного платинового электрода не позволило перевести формат измерений в полностью одноразовый. Кроме того, используемая в изготов-

лении электродов алюмооксидная керамика приводила к удорожанию их себестоимости. В работе [12] была предложена полностью одноразовая ПСС на основе стеклотекстолита, в которой индикаторным электродом служил толсто пленочный углеродсодержащий электрод, модифицированный наночастицами золота. Наночастицы золота были нанесены на поверхность углеродсодержащего электрода способом капельного литья и удерживались за счет физической адсорбции. Данный способ модификации поверхности является обратимым, поскольку образуемые при этом межмолекулярные взаимодействия носят нековалентный характер и могут быть разрушены в условиях эксплуатации или хранения электрода [14]. В этом исследовании была разработана новая одноразовая ПСС на основе модифицированных толсто пленочных электродов, изготовленных с использованием полиэтилентерефталата (ПЭТ) в качестве подложки. Индикаторный электрод был модифицирован объемным способом, при котором наноразмерный наполнитель был введен непосредственно в углеродную пасту. В качестве наноразмерного модификатора использовали многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), которые широко применяются в (био)сенсорах с целью улучшения их электрических, электронных, механических и аналитических характеристик [15, 16]. Разработанная ПСС была успешно апробирована в анализе пищевых продуктов с твердой и полутвердой консистенцией.

Цель исследования – разработка высокоточной одноразовой потенциометрической системы-теста для определения антиоксидантной активности в твердых и полутвердых пищевых системах на примере кондитерских изделий.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования. Все кондитерские изделия были приобретены в торговой розничной сети города Екатеринбурга. Характеристика исследованных кондитерских изделий российского производства представлена в табл. 1. Поскольку используемые образцы при комнатной температуре имели твердую, полутвердую, и упругую желейную стабильные структуры, в тексте далее использовали термин «твердофазные объекты».

Таблица 1

Перечень исследованных кондитерских изделий

Наименование	Изготовитель	Состав
Конфеты, покрытые глянецвателем с железным корпусом СМУЗИ «Eco-botanica» черника-банан	ОАО «Рот Фронт»	Пюре черничное, пюре банановое, краситель антоциан, витаминный премикс
Конфеты, покрытые глянецвателем с железным корпусом СМУЗИ «Eco-botanica» ананас-манго	ОАО «Рот Фронт»	Пюре яблочное, концентрированный ананасовый сок, краситель куркумин, порошок манго, витаминный премикс
Зефир «Eco-botanica» с кусочками брусники, растительным экстрактом и витаминами	ОАО «Рот Фронт»	Пюре яблочное, клюква сушеная (кусочки), брусника сушеная (кусочки), сухой растительный экстракт клюквы, витаминный премикс
Конфеты в шоколаде со сбивным корпусом «Медофеты» суфле с лесной клубникой	ООО «Частные пасеки Берестова»	Антиокислитель токоферол (витамин Е), плодовой наполнитель клубника с земляникой, мед натуральный
Пастилки «Вишня и Смородина»	АО «КФ «Пермская»	Концентрированный яблочный сок, пюре яблочное концентрированное, пюре вишневое концентрированное, концентрированный сок черной смородины, волокна пищевые цитрусовые
Конфеты глазированные «Чернослив Кремлина шоколадный с грецким орехом»	ООО «КФ «Кремлина»	Слива сушеная (чернослив), пюре сливовое, ядро грецкого ореха
Конфеты глазированные «Курага Кремлина шоколадная с грецким орехом»	ООО «КФ «Кремлина»	Абрикос сушеный (курага), пюре абрикосовое, ядро грецкого ореха

Реактивы и материалы. Феррицианид калия $K_3[Fe(CN)_6]$, ферроцианид калия $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$, хлорид калия KCl, хлорид натрия NaCl, гидрофосфат натрия $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ и дигидрофосфат калия KH_2PO_4 квалификации «химически чистый» были поставлены АО «Химреактивснаб» (Россия). Полимерная пленка на основе ПЭТ толщиной 0,5 мм и 5 %-ный раствор Nafion 117 были получены от Fellowes Inc. (США) и Sigma-Aldrich Co. (США), соответственно. Серебряная краска Mechanic DJ912 и углеродные чернила Ceres были приобретены у Shenzhen Welsolo Electronic Technology Co., Ltd. (Китай) и Guangzhou Print Area Co. Ltd. (Китай), соответственно. МУНТ были поставлены ООО «МТС-нано» (Россия). Жидкий изолятор был получен при смешении клея Cementit Universal (Merz+Benteli AG, Швейцария) и ацетона в соотношении 1:5 по объему. Микропористый пленочный материал МФАС-ОС-2 на основе смеси ацетатов целлюлозы (ЗАО НТЦ «Владипор», Россия) ис-

пользовали в качестве мембраны-носителя раствора с медиаторной системой.

Оборудование. Ручной станок трафаретной печати SPR-10 (DDM Novastar Inc., США) и сушильный шкаф ШС-0.25-60 (ООО НПП «Теплоприбор», Россия) использовали для изготовления и сушки толсто пленочных электродов. Вольтамперометрический анализатор ИВА-5 в комплектации с хлорсеребряным электродом ЭВЛ-1М3.1 и стеклоуглеродным стержнем СУ-2000 использовали для реализации потенциостатического режима. Потенциостат-гальваностат PGSTAT 128N в комплектации с хлорсеребряным электродом 6.0726.100 и стеклоуглеродным стержнем 6.1248.040 (Metrohm AG, Швейцария) использовали для циклических вольтамперометрических измерений. рН-метр/иономер ТА-Ион в комплектации с коммерческими электродами или разработанной ПСС использовали для потенциометрических измерений. Коммерческими электродами служили платиновый электрод 6.1204.310 в корпусе из полиэфир-

фиркетона с диаметром диска 3 мм (Metrohm AG, Швейцария) и хлорсеребряный электрод ЭВЛ-1М3.1.

Приготовление объектов исследования. Коллоидные растворы кондитерских изделий получали при растворении последних в горячей воде на водяной бане при 80 °С. Во всех случаях использовалось соотношение 2 г образца к 100 дм³ нагретой до 100 °С деионизованной воды (1:50). Предэкстракционные манипуляции включали удаление глазури кондитерских изделий. Постэкстракционные манипуляции включали охлаждение полученных образцов исследования на водяной бане, а также их последующее фильтрование через многослойную марлю коллоидных растворов кондитерских изделий, отличных от желейных.

Изготовление электродов ПСС. Индикаторный электрод ПСС представлял собой модифицированный толсто пленочный углеродсодержащий электрод. Углеродные чернила с различным содержанием МУНТ (0; 0,5; 1 и 2 % по массе) были нанесены на предварительно очищенную подложку ПЭТ методом трафаретной печати, а затем высушены в печи при 110 °С в течение 30 минут. Немодифицированный и модифицированный толсто пленочные углеродсодержащие электроды были обозначены С/ПЭТ и МУНТ/С/ПЭТ, соответственно. Электрод сравнения ПСС представлял собой модифицированный толсто пленочный серебросодержащий электрод, изготовленный в соответствии с описанными ранее процедурами [11, 12]. На рабочей поверхности толсто пленочного серебросодержащего электрода в потенциометрическом режиме был сформирован смешанный осадок, содержащий преимущественно хлорид серебра и феррицианид серебра. На заключительном этапе модифицированный осадком углеродсодержащий электрод был погружен в 1,25 %-ный раствор Нафiona для формирования защитного слоя, а затем этот электрод был отвержден в печи при 100 °С в течение часа. Единичные модифицированные серебросодержащие электроды имели размеры 40×2×0,5 мм и обозначались как Н/О/Аг/ПЭТ.

Применение ПСС в анализе пищевых образцов. Разработанная ПСС была применена в оценке АОА твердофазных пищевых образцов, примерами которых служили кондитерские изделия. Твердофазные образцы могут быть проанализированы в отсутствии и присутствии нагрузки. Срезы фруктов и овощей

содержат большое количество жидкой фракции (сока), поэтому они могут быть проанализированы без внешнего давления с использованием медиаторной системы состава $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6] = 0,1/0,001$ моль/дм³ [13]. Кондитерские изделия содержат незначительное количество свободной воды, поэтому для измерения стабильного аналитического сигнала (потенциала) потребовалось применение внешнего давления. Электроды ПСС располагали горизонтально в плоскости стола. Поверх электродов укладывали мембрану, пропитанную натрий-фосфатным буфером рН 7,4, содержащим 0,001 моль/дм³ $K_3[Fe(CN)_6]$ и 0,00005 моль/дм³ $K_4[Fe(CN)_6]$. Затем поверх мембраны располагали срез анализируемого кондитерского изделия толщиной (3 ± 1) мм, сделанный при помощи керамического ножа. Сверху устанавливали стальной груз массой 0,5 кг и диаметром основания 36 мм. В таких условиях давление, оказываемое грузом на ПСС и тестируемый образец, составило 4,82 кПа или 36,1 мм рт. ст. [6].

Обработка результатов анализа. АОА жидких образцов в моль-экв/дм³ рассчитывали по формуле:

$$AOA = \frac{C_{Ox} - a \cdot C_{Red}}{1 + a} \cdot d, \quad (1)$$

$$a = \frac{C_{Ox}}{C_{Red}} \cdot 10^{\Delta E F / 2,3RT},$$

где C_{Ox} – концентрация $K_3[Fe(CN)_6]$, моль/дм³; C_{Red} – концентрация $K_4[Fe(CN)_6]$, моль/дм³; $\Delta E = (E_1 - E_2)$ – изменение потенциала от начального до конечного значения, В; $F = 96485,333$ Кл/моль – постоянная Фарадея; $R = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; $T = T(°C) + 273,15$ – термодинамическая температура, К; d – разбавление пробы, безразмерная величина. АОА срезов пересчитывали на один грамм исходных твердофазных образцов по приведенной ниже формуле с учетом следующих допущений:

1) коэффициенты диффузии антиоксидантов в образце и $K_4[Fe(CN)_6]$ в мембране близки и

2) плотность образца и плотность пропитанной мембраны стремятся к единице.

Таким образом,

$$AOA \text{ (моль-экв/г)} = \frac{AOA \text{ (моль-экв/дм}^3\text{)} \cdot 10^{-3}}{\rho}, \quad (2)$$

где АОА(моль-экв/дм³) – значение, найденное по формуле (1); ρ – плотность образца, г/см³. Измерения АОА проводили в трехкратной повторности. Данные представлены в виде

$X \pm \Delta X$, где X – среднее арифметическое, ΔX – стандартное отклонение. Валидация результатов определения АОО пищевых систем, полученных с использованием ПСС, была проведена относительно результатов, полученных с использованием коммерческих электродов. Параметрами валидации служили критерий Фишера (F), критерий Стьюдента (t) и коэффициент корреляции Пирсона (r).

Результаты исследований и их обсуждение

Электрохимическая характеристика индикаторного электрода. В настоящей работе в составе разработанной ПСС применялся описанный ранее электрод сравнения Н/О/Аг/ПЭТ [11, 12], модификацией которого являлось использование неэлектропроводящей подложки (ПЭТ). В связи с этим научный интерес представляла характеристика нового индикаторного электрода, которая была выполнена методами циклической вольтамперометрии и потенциометрии. На рис. 1(а) представлены циклические вольтамперограммы, зарегистрированные с использованием индикаторного углеродсодержащего электрода в натрий-фосфатном буфере рН 7,4, содержащем эквимольное количество ферри- и ферроцианида калия. Увеличение токов, наблюдаемое на циклических вольтамперограммах с ростом концентрации МУНТ, свидетельствует о возрастании электропроводности [15]. В то же время углеродсодержащий

электрод, модифицированный 2% масс. МУНТ, продемонстрировал снижение пластичности. Таким образом, в дальнейших исследованиях использовали углеродсодержащий электрод, модифицированный 1% масс. МУНТ. Зависимость потенциала электрода МУНТ (1% масс.)/С/ПЭТ в натрий-фосфатном буфере рН 7,4, содержащем различное соотношение $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$, представлена на рис. 1(б). Угловым коэффициентом полученной линейной зависимости равен 58,3 мВ, что близко к теоретическому значению коэффициента RT/nF в уравнении Нернста для одноэлектронного процесса, приблизительно равному 59 мВ при 25 °С.

Анализ кондитерских изделий. Применимость ПСС в оценке АОО твердофазных пищевых образцов была продемонстрирована на примере анализа срезов корпусов кондитерских изделий. Результаты оценки АОО срезов кондитерских изделий, полученные с использованием ПСС, были сопоставлены с результатами оценки АОО их коллоидных растворов, полученными с использованием коммерческих электродов. Срезы корпусов кондитерских изделий были проанализированы в отсутствие и присутствии местного давления 4,82 кПа. Результаты анализа срезов кондитерских изделий, полученные без нагрузки, характеризовались низкими значениями АОО, невозпроизводимостью и отсутствием корреляции с результатами анализа коллоидных

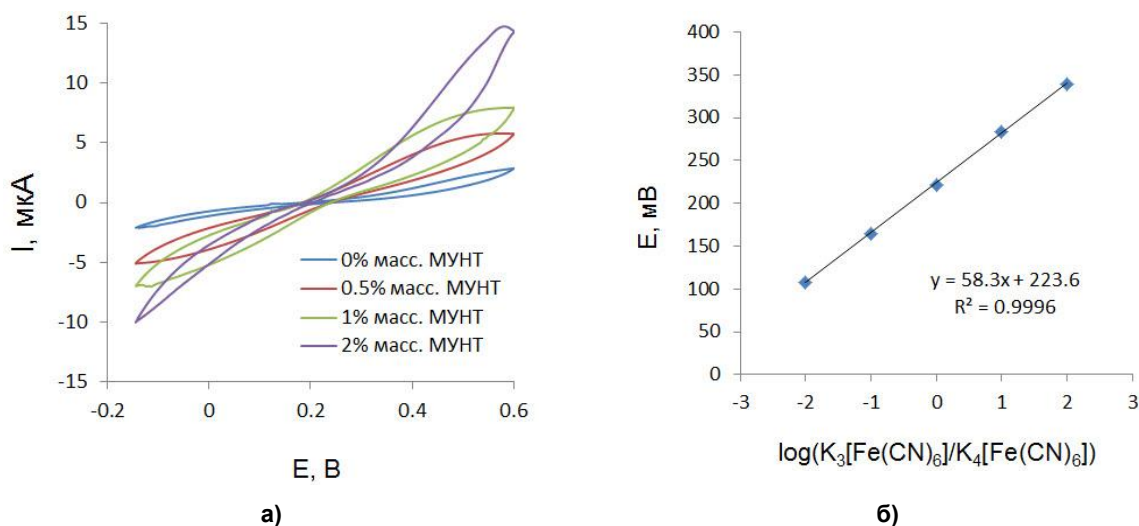


Рис. 1. Циклические вольтамперограммы, зарегистрированные на толстопленочном углеродсодержащем электроде при скорости 50 мВ/с в натрий-фосфатном буфере рН 7,4, содержащем 1 ммоль/дм³ $K_3[Fe(CN)_6]$ и 1 ммоль/дм³ $K_4[Fe(CN)_6]$ (а). Зависимость потенциала МУНТ(1% масс.)/С/ПЭТ в натрий-фосфатном буфере рН 7,4, содержащем различное соотношение $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$ (б)

растворов. Такие расхождения результатов объясняются, по-видимому, присутствием в составе кондитерских изделий влагоудерживающих агентов и, как следствие, незначительным содержанием свободной воды. Пенообразная консистенция, присущая пастильным кондитерским изделиям, также может оказывать влияние на измерительный процесс. Результаты оценки АОА срезов кондитерских изделий, полученные в условиях нагрузки, представлены в табл. 2. В этом случае была обнаружена значительная положительная корреляция с результатами анализа экстрактов: $r = 0,92$, $p < 0,005$.

лоидных растворов растворением при контролируемой температуре в качестве этапа подготовки твердофазных образцов, решают большой спектр аналитических задач, но характеризуются высокой трудоемкостью. Предложенный метод предполагает использование одноразовой потенциометрической сенсорной системы-теста, позволяющей использовать для определения АОА срез изделия под нагрузкой, при этом не требует длительной пробоподготовки. Предложенная ПСС является одноразовой, демонстрирует высокую аналитическую эффективность и может быть изготовлена массово в виде экспресс-тестов

Таблица 2

Результаты анализа кондитерских изделий (n = 3)

Наименование	АОА экстракта $\times 10^4$, моль-экв/дм ^{3*}	АОА среза $\times 10^7$, моль-экв/г ^{**}
Суфле «Медофеты» с лесной клубникой	1,15 \pm 0,05	0,15 \pm 0,07
Конфеты желейные «Еco-botanica» ананас-манго	2,11 \pm 0,07	1,36 \pm 0,15
Конфеты желейные «Еco-botanica» черника-банан	2,45 \pm 0,07	1,81 \pm 0,16
Зефир «Еco-botanica» с кусочками брусники	3,91 \pm 0,15	0,31 \pm 0,10
Пастилки «Вишня и Смородина»	9,98 \pm 0,23	2,14 \pm 0,26
Конфеты «Кремлина» с черносливом и грецким орехом	14,15 \pm 0,33	6,15 \pm 0,51
Конфеты «Кремлина» с курагой и грецким орехом	16,41 \pm 0,37	8,69 \pm 0,63

* При использовании коммерческих электродов.

** При использовании ПСС в условиях внешнего давления 4,82 кПа.

Заключение

Внесение антиоксидантов в пищевые системы с целью увеличения их функционального действия, повышения срока хранения создает потребность для их количественного определения. Существующие методы лабораторного определения АОА в кондитерских изделиях, использующие приготовление кол-

для дальнейшего использования при определении АОА мармелада, зефира, пастильных и сбивных кондитерских изделий как в лабораторных, так и во внелабораторных исследованиях, в том числе в комплектации с потенциометрическим анализатором портативного типа предложенная ПСС может использоваться во внелабораторных условиях.

Список литературы

1. Шарафутдинова Е.Н., Инжеватова О.В., Тоболкина Н.В., Иванова А.В., Брайнина Х.З. Потенциометрический метод определения антиоксидантной активности: Оценка основных метрологических характеристик // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 6. С. 9–14.
2. Заворохина Н.В., Соловьева М.П., Чугунова О.В., Пастушкова Е.В., Фозилова В.В. Расщепляемое сырье Уральского региона для производства безалкогольных напитков антиоксидантной направленности // Пиво и напитки. 2013. № 3. С. 34–37.
3. Чугунова О.В., Заворохина Н.В., Вяткин А.В. Исследование антиоксидантной активности и ее изменения при хранении плодово-ягодного сырья Свердловской области // Аграрный вестник Урала. 2019. Т. 190. № 11. С. 59–65. https://doi.org/10.32417/article_5dcd861e8e0053.57240026
4. Pastushkova E.V., Tikhonov S.L., Chugunova O.V., Pischikov G.B. Tea with herbal additions: Their antioxidant activity and its dependence on high pressure pre-treatment before extraction // Carpathian Journal of Food Science and Technology. 2019. Vol. 11. No. 3. P. 28–38. <https://doi.org/10.34302/crpfst/2019.11.3.3>
5. Tarasov A., Bochkova A., Muzyukin I., Chugunova O., Stozhko N. The effect of pre-treatment of Arabica coffee beans with cold atmospheric plasma, microwave radiation, slow and fast freezing on antioxidant activity of aqueous coffee extract // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 12. Art. 5780. <https://doi.org/10.3390/app12125780>
6. Tarasov A.V., Khamzina E.I., Bukharinova M.A., Stozhko N.Yu. Flexible potentiometric sensor system for non-invasive determination of antioxidant activity of human skin: Application for evaluating the effectiveness of phytocosmetic products // Chemosensors. 2021. Vol. 9. No. 4. Art. 76. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9040076>
7. Иванова А.В., Герасимова Е.Л., Газизуллина Е.Р., Окулова Я.А., Матерн А.И., Русинов В.Л. Антиоксидантная и противорадикальная активность лекарственных средств, предназначенных для лечения офтальмологических заболеваний // Химико-фармацевтический журнал. 2018. Т. 52. № 8. С. 16–21. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2018-52-8-16-21>
8. Бляхман Ф.А., Брайнина А.З., Варзакова Д.П., Герасимова Е.Л., Крохолов В.Я., Телешев В.А., Шкляр Т.Ф. Антиоксидантный статус и системная гемодинамика у лиц молодого возраста // Вестник Уральской медицинской академической науки. 2012. Т. 40. № 3. С. 59–61. EDN PWOUN.
9. Lee G.-J., Lee S.-K., Kim J.-M., Rhee C.K., Lee Y.-K., Brainina Kh.Z., Kazakov Ya.E. Application feasibility of antioxidant activity evaluation using potentiometry in major depressive disorder // Electrochemistry. 2014. Vol. 82. No. 4. P. 264–266. <https://doi.org/10.5796/electrochemistry.82.264>
10. Brainina Kh.Z., Tarasov A.V., Kazakov Ya.E., Vidrevich M.B. Platinum electrode regeneration and quality control method for chronopotentiometric and chronoamperometric determination of antioxidant activity of biological fluids // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2018. Vol. 808. P. 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.11.065>
11. Brainina Kh.Z., Tarasov A.V., Vidrevich M.B. Silver chloride/ferricyanide-based quasi-reference electrode for potentiometric sensing applications // Chemosensors. 2020. Vol. 8. No. 1. Art. 15. <https://doi.org/10.3390/chemosensors8010015>
12. Тарасов А.В., Чугунова О.В., Стожко Н.Ю. Потенциометрическая сенсорная система на основе модифицированных толстопленочных электродов для определения антиоксидантной активности напитков // Индустрия питания | Food Industry. 2020. Т. 5. № 3. С. 85–96. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2020-5-3-10>
13. Brainina Kh., Tarasov A., Khamzina E., Stozhko N., Vidrevich M. Contact hybrid potentiometric method for *on-site* and *in situ* estimation of the antioxidant activity of fruits and vegetables // Food Chemistry. 2020. Vol. 309. Art. 125703. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125703>
14. Будников Г.К., Евтюгин Г.А., Майстренко В.Н. Модифицированные электроды для вольтамперометрии в химии, биологии и медицине. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 416 с. ISBN 978-5-9963-0199-7.

15. Carbon nanotubes. Polymer nanocomposites. Ed. by S. Yellampalli. London: IntechOpen, 2011. 412 p. ISBN 978-953-307-498-6. <https://doi.org/10.5772/979>
16. Rana M.M., Ibrahim D.S., Mohd Asyraf M.R., Jarin S., Tomal A. A review on recent advances of CNTs as gas sensors // *Sensor Review*. 2017. Vol. 37. No. 2. P. 127–136. <https://doi.org/10.1108/SR-10-2016-0230>

References

1. Sharafutdinova E.N., Inzhevatoва O.V., Tobolkina N.V., Ivanova A.V., Brainina Kh.Z. Potentiometric method for determining antioxidant activity: Evaluation of the main metrological characteristics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2008, vol. 74, no. 6, pp. 9–14. (In Russ.)
2. Zavorokhina N.V., Solovyeva M.P., Chugunova O.V., Pastushkova E.V., Fozilova V.V. Vegetable raw materials of the Ural region for the antioxidant soft drinks production. *Pivo i Napitki*, 2013, no. 3, pp. 34–37. (In Russ.)
3. Chugunova O.V., Zavorokhina N.V., Vyatkin A.V. The research of antioxidant activity and its changes during storage of fruit and berry raw materials of the Sverdlovsk region. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2019, vol. 190, no. 11, pp. 59–65. https://doi.org/10.32417/article_5dcd861e8e0053.57240026. (In Russ.)
4. Pastushkova E.V., Tikhonov S.L., Chugunova O.V., Pischikov G.B. Tea with herbal additions: Their antioxidant activity and its dependence on high pressure pre-treatment before extraction. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 28–38. <https://doi.org/10.34302/crpfst/2019.11.3.3>
5. Tarasov A., Bochkova A., Muzyukin I., Chugunova O., Stozhko N. The effect of pre-treatment of Arabica coffee beans with cold atmospheric plasma, microwave radiation, slow and fast freezing on antioxidant activity of aqueous coffee extract. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 12. Art. 5780. <https://doi.org/10.3390/app12125780>
6. Tarasov A.V., Khamzina E.I., Bukharinova M.A., Stozhko N.Yu. Flexible potentiometric sensor system for non-invasive determination of antioxidant activity of human skin: Application for evaluating the effectiveness of phytocosmetic products. *Chemosensors*, 2021, vol. 9, no. 4. Art. 76. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9040076>
7. Ivanova A.V., Gerasimova E.L., Gazizullina E.R., Okulova Ya.A., Matern A.I., Rusinov V.L. Antioxidant and antiradical activity of drugs intended for treatment of ophthalmic disorders. *Khimiko-Farmatsevticheskii Zhurnal*, 2018, vol. 52, no. 8, pp. 16–21. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2018-52-8-16-21>. (In Russ.)
8. Blyakhman F.A., Brainina A.Z., Varzakova D.P., Gerasimova E.L., Krokholev V.Ya., Teleshev V.A., Shklyar T.F. Antioxidant status and systemic hemodynamics in young people population. *Vestnik Ural'skoi meditsinskoi akademicheskoi nauki*, 2012, vol. 40, no. 3, pp. 59–61. (In Russ.)
9. Lee G.-J., Lee S.-K., Kim J.-M., Rhee C.K., Lee Y.-K., Brainina Kh.Z., Kazakov Ya.E. Application feasibility of antioxidant activity evaluation using potentiometry in major depressive disorder. *Electrochemistry*, 2014, vol. 82, no. 4, pp. 264–266. <https://doi.org/10.5796/electrochemistry.82.264>
10. Brainina Kh.Z., Tarasov A.V., Kazakov Ya.E., Vidrevich M.B. Platinum electrode regeneration and quality control method for chronopotentiometric and chronoamperometric determination of antioxidant activity of biological fluids. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, vol. 808, pp. 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.11.065>
11. Brainina Kh.Z., Tarasov A.V., Vidrevich M.B. Silver chloride/ferricyanide-based quasi-reference electrode for potentiometric sensing applications. *Chemosensors*, 2020, vol. 8, no. 1. Art. 15. <https://doi.org/10.3390/chemosensors8010015>
12. Tarasov A.V., Chugunova O.V., Stozhko N.Yu. Potentiometric sensor system based on modified thick-film electrodes for determining the antioxidant activity of beverages. *Industriya pitaniya*, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 85–96. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2020-5-3-10>. (In Russ.)
13. Brainina Kh., Tarasov A., Khamzina E., Stozhko N., Vidrevich M. Contact hybrid potentiometric method for *on-site* and *in situ* estimation of the antioxidant activity of fruits and vegetables. *Food Chemistry*, 2020, vol. 309. Art. 125703. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125703>

14. Budnikov G.K., Evtugin G.A., Maistrenko V.N. *Modificirovannye elektrody dlya vol'tamperometrii v himii, biologii i medicine* [Modified electrodes for voltammetry in chemistry, biology and medicine]. Moscow, 2012. 416 p. ISBN 978-5-9963-0199-7.

15. *Carbon nanotubes. Polymer nanocomposites*. Ed. by S. Yellampalli. London: IntechOpen, 2011. 412 p. ISBN 978-953-307-498-6. <https://doi.org/10.5772/979>

16. Rana M.M., Ibrahim D.S., Mohd Asyraf M.R., Jarin S., Tomal A. A review on recent advances of CNTs as gas sensors. *Sensor Review*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 127–136. <https://doi.org/10.1108/SR-10-2016-0230>

Информация об авторах

Тарасов Алексей Валерьевич, младший научный сотрудник научно-инновационного центра сенсорных технологий, Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия, tarasovav@usue.ru

Заворохина Наталия Валерьевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии питания, Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия, zavornv@usue.ru

Information about the authors

Aleksey V. Tarasov, Junior Researcher of the Scientific and Innovation Center of Sensor Technologies, Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia, tarasovav@usue.ru

Natalia V. Zavorokhina, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Food Technology Department, Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia, zavornv@usue.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2023

The article was submitted 06.03.2023