

Н.Г. Крылова, канд. физ.-мат. наук,

В.В. Мацкело, А.А. Воронович,

*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный
технический университет», г. Минск*

ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КАК МЕТОД ЭКСПРЕСС- ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА МОЛОКА

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, экспресс-диагностика, электропроводность, комплексная диэлектрическая проницаемость, молоко.

Key words: impedance spectroscopy, express diagnostics, electrical conductivity, complex dielectric constant, milk.

Аннотация: В работе рассмотрены основные направления развития метода импедансной спектроскопии в приложении к детектированию качества молока. Проанализированы механизмы, которые могут обеспечить разработку высокочувствительных и селективных систем автоматизированного мониторинга физико-химических свойств молока на основе электрохимических методов анализа.

Abstract: The paper discusses the main directions of the development of the method of impedance spectroscopy as applied to the detection of milk quality. The mechanisms that can ensure the development of highly sensitive and selective systems for automated monitoring of physicochemical properties of milk based on electrochemical methods of analysis are analyzed.

Метод импедансной (диэлектрической) спектроскопии является перспективным для анализа электрохимических и электрофизических свойств различных систем, позволяя проводить как поверхностные измерения, так и измерения в объеме. Преимуществами данного метода являются удобство и дешевизна в использовании, неинвазивность и возможность миниатюризации. Поэтому на основе импедансной спектроскопии можно реализовать простые в использовании, дешевые и эффективные экспресс-методы оценки качества производимой продукции. Показано, что в сельскохозяйственной практике импедансные методы могут применяться для детектирования качества мясной [1] и молочной продукции [2-3], анализа состояния почвы [4], семян [5] и древесины [6].

В настоящее время основной тенденцией модернизации производства молока является разработка автоматизированных адаптивных, энерго-

ресурсосберегающих технологий на основе автоматизированного мониторинга. Так, одной из важных его составляющих является экспресс-анализ нарушений функции вымени, ведущих к снижению молочной продуктивности коров, изменению состава и свойств молока, что уменьшает конкурентоспособность продукции. В работе [3] показано, что внедрение системы автоматизированного мониторинга жирности позволяет повысить качество производимого молока и обеспечивает значительную экономическую выгоду. Современные достижения в биосенсорике и миниатюризации чиповых устройств (так называемые системы “lab-on-a-chip”) на основе электрохимических методов анализа могут обеспечить микробиологический и молекулярно-биохимический контроль в экспресс режиме [7]. Однако, большинство предлагаемых систем все еще требуют разработки технологических решений, конструкционных особенностей, высокоселективных покрытий, а также методов и протоколов работы (в том числе, включающих пробоподготовку и очистку) для каждой задачи ввиду сложности композитного состава биологических образцов.

Так, анализ литературных данных показал, что в настоящее время, разрабатываемые импедансные сенсоры можно условно разделить на два типа. Сенсоры первого типа – это высокоселективные биосенсоры для детектирования определенных химических и биохимических соединений (например, в молоке требуется определять микотоксин, афлотоксин М1, хинолоновые и тетрациклиновые соединения и др.). Такие сенсоры требуют создания высокочувствительного селективного слоя на поверхности электродов. Детектируемое соединение при этом вступает в реакцию с молекулами или группами на поверхности сенсора, что приводит к изменению диэлектрической проницаемости приэлектродного слоя. Показано, что использование наноматериалов, таких как графен, углеродные нанотрубки, квантовые точки, при создании сенсорных слоев может значительно повысить чувствительность метода. В сенсорах второго типа измеряется электрический импеданс в широком диапазоне частот как некоторый обобщенный параметр, характеризующий состав и структуру молока. Применение таких сенсоров может обеспечить экспресс-диагностику отклонения состава молока от нормы вследствие нарушения питания и/или развития заболеваний у животных.

Известно, что удельная электропроводность молока составляет в среднем $46 \cdot 10^{-2} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ и обусловлена ионами Cl^- , Na^+ , K^+ . Электрически заряженные белки (казеин, альбумин, глобулин) и покрытые белковой оболочкой шарики жира тормозят подвижность ионов, уменьшая электропроводность молока. Электропроводность значительно изменяется при различных заболеваниях животных, а также в зависимости от лактационного периода, типа используемых кормов. В частности, показано, что в

маститном молоке удельная электропроводность повышается в среднем на 37 %, что обусловлено увеличением содержания ионов хлора и натрия более, чем в 2 раза [8]. В настоящее время, кондуктометрический метод используется для экспресс-диагностики субклинического мастита у коров. В то же время, недостатком данного метода является его неселективность (неспецифичность) к маститу и значительно меньшая чувствительность по сравнению со стандартным микроскопическим методом измерения числа соматических клеток в молоке. Так, например, при туберкулезе вымени может повышаться количество солей за счет хлористых соединений, что также может приводить к изменению удельной электропроводности.

Комплексная диэлектрическая проницаемость молока определяется дипольной поляризацией, в которую будут давать вклад молекулярные диполи белков и шариков жира. При этом каждый из типов диполей будет характеризоваться своим микроскопическим временем релаксации, что обуславливает необходимость учета распределения по временам релаксации. Вследствие этого модель Дебая неприменима, для нахождения диэлектрической проницаемости необходимо использовать так называемые дробно-степенные модели (fractional models), такие как распределение Девидсона-Коула и формула Гаврильяка-Негами [9]. В работе [10] показано, что экспериментальные данные хорошо описываются эмпирической 6-ти параметрической формулой

$$\underline{Z}(j\omega) = K \frac{(1 + j\omega / z_1)^{a_1} (1 + j\omega / z_2)^{a_2}}{(j\omega)^b}, \quad (1)$$

где \underline{Z} – импеданс молока, ω – угловая частота, коэффициенты β и z_2 зависят от кислотности молока, содержания белков, жиров и кальция, коэффициент a_2 определяется только содержанием сахара. Изменения в кислотности, вязкости, содержании жира, количестве ферментов (каталаза, липаза) в молоке, полученном от больных маститом коров, будут приводить к изменению зависимости импеданса молока от частоты (1). Использование многопараметрической модели может обеспечить значительно большую чувствительность и селективность метода импедансной спектроскопии по сравнению с кондуктометрией.

При синтезе эквивалентной электрической схемы электрохимической ячейки с молоком требуется последовательно с резистивным элементом, который определяет электрическую проводимость молока, включить элемент постоянной фазы, который моделирует диффузионные процессы с учетом распределения времен релаксации [11]. В зависимости от конструктивных особенностей импедансного сенсора и наличия селективного чувствительного слоя (иммобилизованные антитела, ферменты, редокс-активные молекулы), обеспечивающего протекание на поверхности элек-

трохимической реакции, могут быть использованы схемы Фрумкина-Мелик-Гайказяна для описания адсорбционных процессов и модели Максвелла или лестничные модели для описания протекающих электрохимических реакций [12].

Таким образом, развитие и внедрение импедансных методов перспективно для разработки высокочувствительных и селективных систем автоматизированного мониторинга качества молока.

Список использованной литературы

1. Electrical impedance spectroscopy for quality assessment of meat and fish: a review on basic principles, measurement methods, and recent advances / X. Zhao [et al.] // *Hindawi Journal of Food Quality* – 2017. – Vol. 2017. – Article ID 6370739.

2. Paniel, N. Development of an electrochemical biosensor for the detection of aflatoxin M1 in milk / N. Paniel, A. Radoi, J.-L. Marty // *Sensors* – 2010. – Vol. 10. – P. 9439–9448.

3. Таран, Е.Н. Контроль жирности молока в системе автоматизированного мониторинга молочной фермы / Е.Н. Таран // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Зерноград, 2011.

4. Perspective electrochemical sensors for soil quality assessment / Md. A. Ali [et al.] // *Journal of the Electrochemical Society* – 2020. – Vol. 167. – Article 037550.

5. Jocsak, I. Electrical impedance measurement on plants: a review with some insights to other fields / I. Jocsak, G. Vegvari, E. Vozary // *Theor. Exp. Plant Physiol.* – 2019. – Vol. 31. – P. 359–375.

6. Ковалев, А.В. Диэлектрическая фурье-спектроскопия в оценке состояния деревьев в очагах массового размножения короедов / А.В. Ковалев, R. Jakuš, Е.Н. Пальникова, В.Г. Суховольский // *Хвойные бореальной зоны* – 2016. – Т. XXXIV, № 1–2. – С. 44–51.

7. Biosensors for on-farm diagnosis of mastitis. / S.A.M. Martins [et al.] // *Front. Bioeng. Biotechnol.* – 2019. – Vol. 7. – Article 186.

8. Дудкина, А.А. Кондуктометрический метод контроля молока и молочной продукции / Дудкина А.А // X Международная студенческая научная конференция, Студенческий научный форум – 2018.

9. Гусев, Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии: Учебное пособие. – Казань: КГУ, 2008. – 112 с.

10. Lopes, A.M. Milk characterization using electrical impedanc spectroscopy and fractional models / A.M. Lopes, J. A. T. Machado, E. Ramalho, V. Silva // *Food Anal. Methods* – 2018. – Vol.11. – P. 901–912.

11. Abdelkafi, A. Impedance investigation of milk dilution / A. Abdelkafi, P. Büschel, A. Fendri, O. Kanoun // *Proc. AMA Sensor and Test.* – May 2015. – P. 156–159.

12. Импедансная спектроскопия: теория и применение : учеб. пособие / [Ю.В. Емельянова, М.В. Морозова, З.А. Михайловская, Е.С. Буянова ; под общ. ред. Е.С. Буяновой] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 156 с.

УДК 631.331

В.Г. Самосюк, канд. экон. наук, доцент,
В.Н. Гутман, канд. техн. наук, доцент,
Учреждение образования "Барановичский государственный университет", г. Барановичи

О НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ СПРАВОЧНИКА ПО НАИЛУЧШИМ ДОСТУПНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ (НДТ) ПРИ ИНТЕНСИВНОМ СВИНОВОДСТВЕ В БЕЛАРУСИ

Ключевые слова: наилучшие доступные технологии, справочник, критерии оценки.

Key words: best available technologic.

Аннотация. В статье обосновывается необходимость разработки информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям при интенсивном разведении свиней в Республике Беларусь.

Abstract. The article substantiates the need to develop an information and technical guide on the best available technologies for intensive pig breeding in the Republic of Belarus.

В Российской Федерации уделяется большое внимание разработке нормативно-технической базы для развития и внедрения инновационных технологий во всех отраслях промышленности, аграрного производства и перерабатывающей сфере, направленных на эффективное ресурсно- и энергосберегающее потребление сырья с соблюдением требований защиты окружающей среды.

Так Правительством Российской Федерации принято Постановление от 23.12.2014 № 1458 «О порядке определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям». Этим же Постановлением Правительства Российской Федерации от 23.12.2014 № 1458 утверждены «Правила определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также