

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ЖИРНОСТИ МОЛОКА НА ОСНОВЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А.В. Шкирин^{1,2}

avshkirin@mephi.ru

В.А. Козлов^{1,3}

vkozlov@bmstu.ru

Д.Н. Игнатенко¹

dmitriyek13104@yandex.ru

Д.Ю. Павкин⁴

dimqaqa@mail.ru

В.В. Кирсанов⁴

kirvv2014@mail.ru

¹ИОФ РАН, Москва, Российская Федерация

²НИЯУ МИФИ, Москва, Российская Федерация

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

⁴ФНАЦ ВИМ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Для определения процентного содержания жировой составляющей молока разработан прототип малогабаритного волоконно-оптического датчика. Принцип работы датчика основан на фотолюминесцентной спектроскопии с использованием волоконно-оптической системы, построенной по схеме разветвления на два оптических канала для доставки излучения накачки и приема флуоресцентного сигнала. Флуоресценция молока возбуждается излучением диодного УФ-лазера с длиной волны 369 нм. Ввод излучения накачки в молочную трубку осуществляется многомодовым оптическим волокном с диаметром сердцевины 50 мкм, которое одновременно используется для детектирования излучения флуоресценции. Спектр флуоресценции регистрируется с использованием волоконно-оптического мини-спектрометра в диапазоне значений 370...800 нм. На основе экспериментально измеренных спектров флуоресценции для образцов молока различной жирности установлено, что интенсивности двух пиков флуоресценции коровьего молока на длинах волн 390 и 780 нм проявляют монотонную зависимость от процентного количества жира в молоке. Построены зависимости интенсивности максимумов флуоресценции от жирности молока в диапазоне значе-

Ключевые слова

Волоконно-оптический датчик, флуорометрия, контроль, спектр, флуоресценция

ний 0,05...6 %.	Для полученных зависимостей	Поступила 20.03.2023
найжены функциональные аппроксимации, которые	могут быть использованы для калибровки датчика	Принята 08.06.2023
		© Автор(ы), 2024

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант РНФ № 23-26-00110, <https://rscf.ru/project/23-26-00110/>)

Введение. Автоматизированный контроль состава молока на основе сенсорных технологий — важный процесс, влияющий на эффективность молочного производства, в том числе молочных ферм. Экспресс-анализ процентного содержания компонентов молока (жир, белки, лактоза, аминокислоты, прогестерон и др.) и микробиологических примесей (например, соматические клетки) является основой оценки параметров качества молока, которые дают необходимую информацию для установления сбалансированного питания коров и диагностики их клинического состояния [1–3]. В частности, основной критерий, определяющий рыночную стоимость молока, — содержание в нем жира и белка. Контроль состава молока в режиме реального времени позволяет оперативно реагировать на отклонения параметров, характеризующих физиологическое состояние животных, и при снижении удоев своевременно корректировать их рацион.

Контрольные устройства, предназначенные для встраивания в доильные системы, должны удовлетворять требованию отсутствия значительного падения давления внутри молочного шланга [4]. Поэтому при проектировании датчиков, которые используются для молочного оборудования на фермах, оптические методы анализа состава молока выглядят наиболее перспективными вследствие их высокой чувствительности и быстрого действия вместе с возможностью бесконтактной неразрушающей диагностики [5–12].

Как правило, оперативная оценка количественного содержания компонентов молока проводится с помощью приборов, основанных на использовании спектральных методов, например ИК-спектроскопии [13]. Однако включение ИК-спектроскопии пропускания в доильные системы требует создания тонкого слоя молока, что снижает скорость его откачки. ИК-спектроскопия отражения позволяет исключить эту проблему, но точность анализа снижается в результате влияния диффузного рассеяния на интенсивность отражения. Высокоточные системы, использующие ИК-спектроскопию с преобразованием Фурье, очень дороги и имеют крупные габариты. В качестве альтернативы ИК-фурье-спектрометрам применяют более компактные и менее дорогие анализаторы состава молока, работающие в ближнем ИК-диапазоне [14].

Флуоресцентная спектроскопия также представляется одним из перспективных методов [9], на основе которого могут быть созданы компактные и относительно недорогие анализаторы компонентного состава молока. Важное преимущество флуоресцентной спектроскопии — высокая чувствительность, обеспечивающая точное измерение концентрации флуоресцентных молекул. Основными флуорофорами в молочных продуктах являются белки (в первую очередь, казеин), рибофлавин, витамин А, ароматические аминокислоты, продукты реакции Майяра, NADH, порфирины, хлорофиллы и продукты окисления липидов. Для эффективного возбуждения флуоресценции различных органических компонентов молока используется излучение накачки в диапазоне значений 260...400 нм [15–18]. В частности, жировой компонент молока проявляет флуоресцентные свойства при возбуждении в ближнем УФ-диапазоне за счет растворенного в нем витамина А. Поскольку содержание белка и лактозы в коровьем молоке слабо меняется в процессе доения и может быть предсказано исходя из средних данных для используемых пород коров, наиболее актуален экспресс-контроль содержания жира.

В настоящей работе предложен прототип датчика, измеряющего процентное содержание жирового компонента молока, на основе волоконно-оптической системы ввода зондирующего излучения и приема излучения флуоресценции. Принцип работы датчика основан на измерении интенсивности пиков флуоресценции молока, которое облучается диодным УФ-лазером на длине волны 369 нм с помощью оптического волокна. Волоконно-оптическая система построена по схеме разветвления основного волокна, встроенного в молочную трубку, на две ветви для передачи излучения накачки и детектирования флуоресцентного отклика [19]. Отметим, что волоконно-оптический зонд такого типа использовался для измерений жирности молока в контейнерах флуоресцентным методом при возбуждении на длине волны 530 нм [20]. Новизна предложенного датчика заключается в том, что в нем использовано излучение накачки с длиной волны в ближнем УФ-диапазоне, что повышает эффективность возбуждения флуоресценции молока и чувствительность измерений жирности. Кроме того, датчик адаптирован для соединения с молокопроводами.

Оптическая схема датчика. Экспериментальный образец датчика представляет собой лазерный фотолюминесцентный спектрометр с волоконно-оптической системой ввода и приема излучения (рис. 1). Излучение непрерывного диодного УФ-лазера с длиной волны 369 нм вводится с помощью оптического волокна в заполненную молоком цилиндрическую трубку

из коррозионно-стойкой стали. Поскольку то же самое оптическое волокно используется для приема флуоресцентного сигнала, оно входит в молочную трубку под углом 60° относительно оси трубки для обеспечения эффективного сбора излучения флуоресценции при движении молока. В установке использовалось многомодовое оптическое волокно с диаметром сердцевины 50 мкм, которое разветвлено на два кабеля для доставки излучения накачки и передачи излучения флуоресценции. Далее излучение флуоресценции анализируется волоконно-оптическим мини-спектрометром, имеющим спектральный диапазон 240...1000 нм и разрешение менее 2 нм. Спектры флуоресценции записывались персональным компьютером.

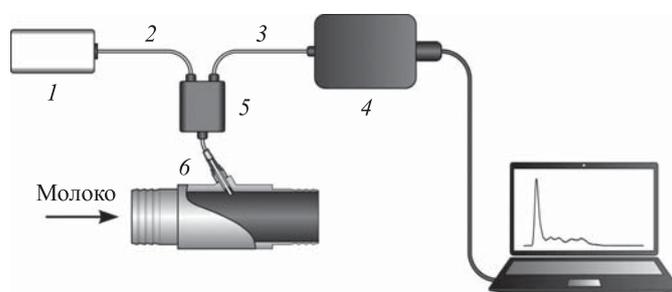


Рис. 1. Схема флуоресцентного датчика жирности молока с волоконно-оптической системой доставки и приема излучения:

1 — диодный лазер с длиной волны 369 нм; 2 — оптическое волокно для ввода излучения накачки; 3 — оптическое волокно для приема излучения флуоресценции; 4 — мини-спектрометр; 5 — волоконно-оптический разветвитель; 6 — цилиндрическая трубка, заполненная молоком

Результаты экспериментов. Датчиком (см. рис. 1) измерены спектры флуоресценции для серии образцов коровьего молока с номинальной жирностью 0,05; 0,5; 1,5; 3,2; 6,0 %, промышленно произведенных в соответствии с технологией ультрапастеризации и гомогенизации. Содержание белка 3,0 г на 100 г продукта для всех образцов. Результаты измерений спектров интенсивности флуоресценции образцов молока в диапазоне значений 370...800 нм приведены на рис. 2. Измерения проведены на неподвижном молоке при температуре 20 °С. Время задержки между поглощением излучения накачки частицами молочного жира и эмиссией флуоресцентного излучения составляет примерно 10^{-8} с [21]. В связи с этим было предположено, что при типичной для доильных систем скорости движения молока в канале менее 100 см/с вследствие незначительного смещения частиц относительно оптического волокна существенного экранирования излучения флуоресценции, вызванной экстинкцией молока, происходить не будет.

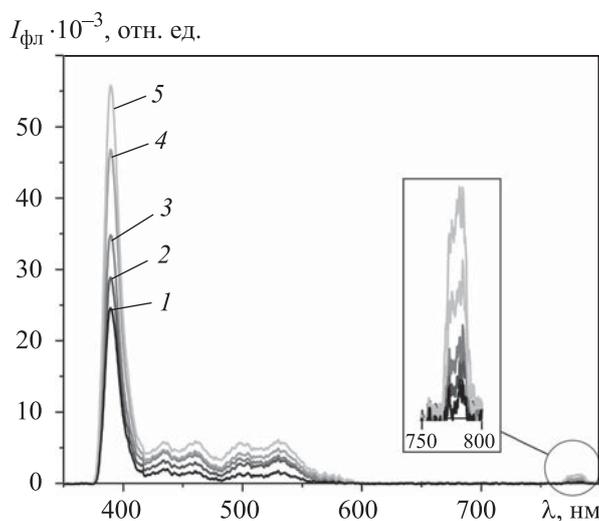


Рис. 2. Спектры флуоресценции молочных образцов с номинальной жирностью 0,05 (1), 0,5 (2), 1,5 (3), 3,2 (4), 6,0 % (5) при длине волны излучения накачки 369 нм и температуре образцов 20 °С

Интенсивность пиков флуоресценции монотонно возрастает с увеличением содержания жира в исследованном диапазоне значений жирности 0,05...6,0 %. Значения интенсивности флуоресценции, соответствующие различным значениям жирности молока, могут быть дискриминированы с наибольшей точностью на длинах волн, соответствующих максимумам флуоресцентных пиков. Отметим, что зависимость интенсивности пиков флуоресценции от жирности проявляет наиболее строгую монотонность на длинах волн 390 и 780 нм, тогда как для пиков, наблюдаемых в области 420...600 нм, монотонность менее выражена.

Для практического использования датчика жирности молока построены зависимости интенсивности флуоресценции, нормированной по отношению к обезжиренному молоку (жирность 0,05 %), от жирности молока в максимумах пиков, расположенных на длинах волн 390 (рис. 3, а) и 780 нм (рис. 3, б). Полученные зависимости аппроксимированы функциями, которые могут быть использованы для калибровки датчика.

Зависимость нормированной интенсивности флуоресценции на длине волны 390 нм от жирности молока (см. рис. 3, а) может быть аппроксимирована логарифмической функцией $F_{390 \text{ нм}}(x) = 0,95 \ln(x + 2) + 0,3$, а на длине волны 780 нм (см. рис. 3, б) — линейной функцией $F_{780 \text{ нм}}(x) = 0,98x + 1$.

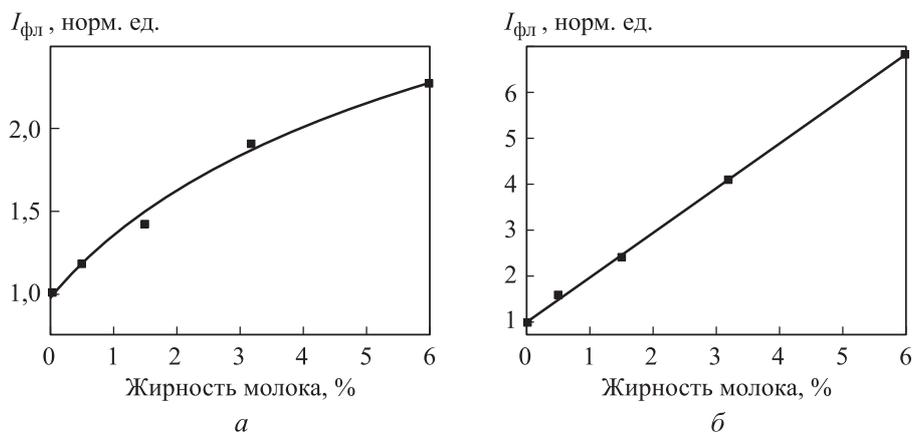


Рис. 3. Зависимость нормированной интенсивности флуоресценции молока на длине волны 390 (а) и 780 нм (б) от жирности молока при длине волны излучения накачки 369 нм и температуре образцов молока 20 °С

В целях удешевления практической реализации датчика имеет смысл использовать для детектирования интенсивности конкретного пика флуоресценции оптические фильтры вместо спектрометра. В таком датчике жирность молока определяется по измеренным значениям интенсивности флуоресценции на выбранной длине волны 390 или 780 нм с помощью обратных функций $F_{\lambda}^{-1}(I_{\text{фл}})$. Следует отметить, что в таком датчике коэффициент дискриминации, определяемый как производная интенсивности флуоресценции по жирности, выше на длине волны 780 нм, чем на длине 390 нм. Однако отношение уровня сигнала флуоресценции к уровню шуму на длине волны 780 нм снижается по сравнению с длиной 390 нм.

Заключение. Предложен прототип компактного и относительно недорогого датчика жирности молока, основанного на регистрации интенсивности пиков флуоресценции с использованием волоконно-оптической системы. Измеренные мини-спектрометром спектры флуоресценции образцов молока различной жирности показали, что интенсивности пиков флуоресценции коровьего молока имеют монотонную зависимость от жирности молока. Функциональные аппроксимации зависимости интенсивности в максимумах пиков флуоресценции на длинах волн 390 и 780 нм от жирности молока, построенные при нормировке на значение для обезжиренного молока, могут быть применены для калибровки датчика в составе доильной системы или технологической линии. При работе на одной из выбранных длин волн спектрометр может быть заменен оптическими фильтрами, что позволит существенно снизить стоимость такого датчика.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Harding F., eds. Milk quality. Boston, MA, Springer, 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2195-2>
- [2] Truong T., Lopez C., Bhandari B., et al. (eds.) Dairy fat products and functionality. Cham, Springer, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41661-4>
- [3] Alsaftli Z. The obstacles to using milk composition as management tool in dairy cattle farms. *J. Adv. Dairy. Res.*, 2020, vol. 8, no. 1, art. 233.
- [4] ICAR certifications for milk meters for cow sheep goats. *icar.org*.
URL: <https://www.icar.org/index.php/certifications/icar-certifications-for-milk-meters-for-cow-sheep-goats> (дата обращения: 24.05.2023).
- [5] Hu Y.T., Ting Y., Hu J.Y., et al. Techniques and methods to study functional characteristics of emulsion systems. *J. Food Drug Anal.*, 2017, vol. 25, iss. 1, pp. 16–26.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.10.021>
- [6] Palberg T., Ballauff M., ed. Optical methods and physics of colloidal dispersions. Vol. 104. Steinkopff, Springer, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/BFb0110733>
- [7] Gastélum-Barrios A., Soto-Zarazúa G.M., Escamilla-García A., et al. Optical methods based on ultraviolet, visible, and near-infrared spectra to estimate fat and protein in raw milk: a review. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 12, art. 3356.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s20123356>
- [8] Michels R., Foschum F., Kienle A. Optical properties of fat emulsions. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, iss. 8, pp. 5907–5925. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.16.005907>
- [9] Chao K., Kim M.S., Lawrence K.C. Optical methods for food inspection. *Sens. & Instrumen. Food Qual.*, 2008, vol. 2, no. 2, pp. 73–74.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-008-9048-y>
- [10] Lakowicz J.R. Principles of fluorescence spectroscopy. New York, NY, Springer, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-46312-4>
- [11] Khosroshahi M.E., Patel Y., Woll-Morison V. Non-destructive assessment of milk quality using pulsed UV photoacoustic, fluorescence and near FTIR spectroscopy. *Laser Phys. Lett.*, 2022, vol. 19, no. 7, art. 075602.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1612-202X/ac6fc5>
- [12] van den Berg F., Lyndgaard C.B., Sørensen K.M., et al. Process analytical technology in the food industry. *Trends Food Sci. Technol.*, 2013, vol. 31, iss. 1, pp. 27–35.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.04.007>
- [13] Burmistrov D.E., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., et al. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. *Photonics*, 2021, vol. 8, iss. 12, art. 551. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics8120551>
- [14] Uusitalo S., Diaz-Olivares J., Sumen J., et al. Evaluation of MEMS NIR spectrometers for on-farm analysis of raw milk composition. *Foods*, 2021, vol. 10, iss. 11, art. 2686.
DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10112686>

- [15] Andersen C.M., Mortensen G. Fluorescence spectroscopy: a rapid tool for analyzing dairy products. *J. Agric. Food Chem.*, 2008, vol. 56, iss. 3, pp. 720–729. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf072025o>
- [16] Karoui R., Blecker C. Fluorescence spectroscopy measurement for quality assessment of food systems — a review. *Food Bioprocess. Technol.*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 364–386. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0370-0>
- [17] Shaikh S., O'Donnell C. Applications of fluorescence spectroscopy in dairy processing: a review. *Curr. Opin. Food Sci.*, 2017, vol. 17, pp. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.08.004>
- [18] Dimitrova T., Eftimov T., Kabadzhov V., et al. Scattering and fluorescence spectra of cow milk. *Bulg. Chem. Commun.*, 2014, vol. 46, spec. iss. B, pp. 39–43.
- [19] Pérez M.A., González O., Arias J.R. Optical fiber sensors for chemical and biological measurements. In: *Current Developments in Optical Fiber Technology*. Intech Open, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5772/52741>
- [20] Wang X., Jiaojiao B., Juanjuan P., et al. Milk quality control: instant and quantitative milk fat determination with a BODIPY sensor-based fluorescence detector. *Chem. Commun.*, 2014, vol. 50, iss. 72, pp. 10398–10401. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/C4CC04670F>
- [21] King N. Fluorescence microscopy of fat in milk and milk powder. *J. Dairy Res.*, 1955, vol. 22, iss. 2, pp. 205–210. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022029900007731>

Шкирин Алексей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Центра биофотоники ИОФ РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38); ведущий инженер кафедры лазерной физики НИЯУ МИФИ (Российская Федерация, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31).

Козлов Валерий Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ИОФ РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38); доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Игнатенко Дмитрий Николаевич — аспирант Центра биофотоники ИОФ РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38).

Павкин Дмитрий Юрьевич — канд. техн. наук, заведующий лабораторией ФНАЦ ВИМ (Российская Федерация, 109428, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5).

Кирсанов Владимир Вячеславович — член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом ФНАЦ ВИМ (Российская Федерация, 109428, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шкирин А.В., Козлов В.А., Игнатенко Д.Н. и др. Волоконно-оптический датчик жирности молока на основе фотOLUMИнесцентной спектроскопии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 1 (112), с. 93–103.

EDN: DTQUFX

MILK FAT FIBER-OPTIC SENSOR BASED ON THE PHOTOLUMINESCENCE SPECTROSCOPY

A.V. Shkirin^{1,2}

avshkirin@mephi.ru

V.A. Kozlov^{1,3}

vkozlov@bmstu.ru

D.N. Ignatenko¹

dmitriyek13104@yandex.ru

D.Yu. Pavkin⁴

dimqaqa@mail.ru

V.V. Kirsanov⁴

kirvv2014@mail.ru

¹ Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

² National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

⁴ Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract

A prototype of the small-sized fiber-optic sensor was developed to determine the fat component percentage in milk. The sensor operation principle was based on the photoluminescence spectroscopy using a fiber-optic system based on the scheme of branching in the two optical channels to deliver pump radiation and receive the fluorescent signal. Milk fluorescence was excited by irradiation from the UV diode laser with the wavelength of 369 nm. Pump radiation was introduced into the milk tube by the multimode optical fiber with the core diameter of 50 μm , which was also used to detect the fluorescence radiation. The fluorescence spectrum was registered using the fiber-optic mini-spectrometer operating in the range of 370–800 nm. Based on the experimentally measured fluorescence spectra for milk samples with the different fat content, it was found that intensities of the cow milk two fluorescence peaks at the wavelengths of 390 and 780 nm exhibited monotonic dependence on the fat percentage in milk. Dependences of the fluorescence maxima intensity on the milk fat content in the range 0.05–6 % were plotted. Functional approximations were found for the obtained dependencies, they could be used to calibrate the sensor

Keywords

Fiber-optic sensor, fluorometry, control, spectrum, fluorescence

Received 20.03.2023

Accepted 08.06.2023

© Author(s), 2024

*The work was supported by the Russian Science Foundation
(grant no. 23-26-00110, <https://rscf.ru/project/23-26-00110/>)*

REFERENCES

- [1] Harding F., eds. Milk quality. Boston, MA, Springer, 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2195-2>
- [2] Truong T., Lopez C., Bhandari B., et al. (eds.) Dairy fat products and functionality. Cham, Springer, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41661-4>
- [3] Alsaftli Z. The obstacles to using milk composition as management tool in dairy cattle farms. *J. Adv. Dairy. Res.*, 2020, vol. 8, no. 1, art. 233.
- [4] ICAR Certifications for milk meters for cow sheep goats. *icar.org*. Available at: <https://www.icar.org/index.php/certifications/icar-certifications-for-milk-meters-for-cow-sheep-goats> (accessed: 24.05.2023).
- [5] Hu Y.T., Ting Y., Hu J.Y., et al. Techniques and methods to study functional characteristics of emulsion systems. *J. Food Drug Anal.*, 2017, vol. 25, iss. 1, pp. 16–26.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.10.021>
- [6] Palberg T., Ballauff M., ed. Optical methods and physics of colloidal dispersions. Vol. 104. Steinkopff, Springer, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/BFb0110733>
- [7] Gastélum-Barrios A., Soto-Zarazúa G.M., Escamilla-García A., et al. Optical methods based on ultraviolet, visible, and near-infrared spectra to estimate fat and protein in raw milk: a review. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 12, art. 3356.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s20123356>
- [8] Michels R., Foschum F., Kienle A. Optical properties of fat emulsions. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, iss. 8, pp. 5907–5925. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.16.005907>
- [9] Chao K., Kim M.S., Lawrence K.C. Optical methods for food inspection. *Sens. & Instrumen. Food Qual.*, 2008, vol. 2, no. 2, pp. 73–74.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-008-9048-y>
- [10] Lakowicz J.R. Principles of fluorescence spectroscopy. New York, NY, Springer, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-46312-4>
- [11] Khosroshahi M.E., Patel Y., Woll-Morison V. Non-destructive assessment of milk quality using pulsed UV photoacoustic, fluorescence and near FTIR spectroscopy. *Laser Phys. Lett.*, 2022, vol. 19, no. 7, art. 075602.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1612-202X/ac6fc5>
- [12] van den Berg F., Lyndgaard C.B., Sørensen K.M., et al. Process analytical technology in the food industry. *Trends Food Sci. Technol.*, 2013, vol. 31, iss. 1, pp. 27–35.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.04.007>
- [13] Burmistrov D.E., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., et al. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. *Photonics*, 2021, vol. 8, iss. 12, art. 551. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics8120551>
- [14] Uusitalo S., Diaz-Olivares J., Sumen J., et al. Evaluation of MEMS NIR spectrometers for on-farm analysis of raw milk composition. *Foods*, 2021, vol. 10, iss. 11, art. 2686.
DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10112686>
- [15] Andersen C.M., Mortensen G. Fluorescence spectroscopy: a rapid tool for analyzing dairy products. *J. Agric. Food Chem.*, 2008, vol. 56, iss. 3, pp. 720–729.
DOI: <https://doi.org/10.1021/jf072025o>

- [16] Karoui R., Blecker C. Fluorescence spectroscopy measurement for quality assessment of food systems — a review. *Food Bioprocess. Technol.*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 364–386. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0370-0>
- [17] Shaikh S., O'Donnell C. Applications of fluorescence spectroscopy in dairy processing: a review. *Curr. Opin. Food Sci.*, 2017, vol. 17, pp. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.08.004>
- [18] Dimitrova T., Eftimov T., Kabadzhov V., et al. Scattering and fluorescence spectra of cow milk. *Bulg. Chem. Commun.*, 2014, vol. 46, spec. iss. B, pp. 39–43.
- [19] Pérez M.A., González O., Arias J.R. Optical fiber sensors for chemical and biological measurements. In: *Current Developments in Optical Fiber Technology*. Intech Open, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5772/52741>
- [20] Wang X., Jiaojiao B., Juanjuan P., et al. Milk quality control: instant and quantitative milk fat determination with a BODIPY sensor-based fluorescence detector. *Chem. Commun.*, 2014, vol. 50, iss. 72, pp. 10398–10401. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/C4CC04670F>
- [21] King N. Fluorescence microscopy of fat in milk and milk powder. *J. Dairy Res.*, 1955, vol. 22, iss. 2, pp. 205–210. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022029900007731>

Shkirin A.V. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Biophotonics Center, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (Vavilova ul. 38, Moscow, 119991 Russian Federation); Leading Engineer, Department of Laser Physics, National Research Nuclear University MEPhI (Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409 Russian Federation).

Kozlov V.A. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (Vavilova ul. 38, Moscow, 119991 Russian Federation); Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Ignatenko D.N. — Post-Graduate Student, Biophotonics Center, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (Vavilova ul. 38, Moscow, 119991 Russian Federation).

Pavkin D.Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Head of Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1-y Institutskiy proezd 5, Moscow, 109428 Russian Federation).

Kirsanov V.V. — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1-y Institutskiy proezd 5, Moscow, 109428 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Shkirin A.V., Kozlov V.A., Ignatenko D.N., et al. Milk fat fiber-optic sensor based on the photoluminescence spectroscopy. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 1 (112), pp. 93–103 (in Russ.).

EDN: DTQUFX