

Моделирование влияния проточного устройства анализа качества молока на поток в доильной установке

Дмитрий Юрьевич Павкин¹,
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией,
e-mail: dimqaqa@mail.ru;
Артем Рустамович Хакимов¹,
аспирант, младший научный сотрудник,
e-mail: arty.hv@gmail.com;

Алексей Владимирович Шкирин²,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: avshkirin@mephi.ru;
Сергей Сергеевич Юрочка¹,
младший научный сотрудник,
e-mail: yurochkaSR@gmail.com;
Дмитрий Николаевич Игнатенко²,
аспирант, и.о. младшего научного сотрудника,
e-mail: dmitriyek13104@yandex.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что для развития молочных ферм необходимы технологии быстрого и неразрушающего анализа качества молока. Отметим, что оптические методы не влияют на молочную продукцию. Подчеркнули, что модернизация доильных установок проточным устройством экспресс-анализа качества молока позволит обеспечить ферму необходимой технологией. (*Цель исследования*) Изучить влияние проточного устройства экспресс-анализа качества молока на поток молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге. (*Материалы и методы*) Использовали имитационное моделирование в программе *SolidWorks*. Разработанное устройство, как и имитационную модель, выполнили в цилиндрической геометрии для совместимости с молочными шлангами диаметром 14 миллиметров. При измерении учитывали угловое распределение света, рассеянного молоком, которое протекает внутри оптически прозрачной цилиндрической стеклянной трубки. На протекание потока молоковоздушной смеси влияло только изменение внутреннего диаметра молочных трубок. (*Результаты и обсуждение*) Отметим, что имитационная модель продемонстрировала увеличение скорости потока молоковоздушной смеси в областях перехода потока между молочным шлангом и штуцером (на меньший внутренний диаметр), а также между штуцером и измерительной камерой устройства (на больший внутренний диаметр). Зеркальный результат зафиксировали при выходе потока из измерительной камеры в штуцер и переходе из штуцера в молочный шланг. (*Выводы*) Выявили, что наличие устройства повышает среднюю скорость потока, равную 0,3-0,7 метра в секунду, на 14 процентов. Определили, что из-за неполного заполнения молочного шланга при доении разница скоростей потока молоковоздушной смеси до и после устройства не оказывает негативного влияния на работу доильной установки. Доказали, что возможна модернизация доильной установки проточным устройством экспресс анализа качества молока. **Ключевые слова:** молочная ферма, цифровизация, имитационное моделирование, анализ качества молока, проточный анализатор.

■ **Для цитирования:** Павкин Д.Ю., Хакимов А.Р., Шкирин А.В., Юрочка С.С., Игнатенко Д.Н. Моделирование влияния проточного устройства анализа качества молока на поток в доильной установке // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 70-75. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-70-75. EDN QOUWDX.

Simulating the Influence of a Flow-Through Device for Milk Quality Analysis on The Flow Rate in the Milking Machine

Dmitriy Yu. Pavkin¹,
Ph.D.(Eng.), head of laboratory,
e-mail: dimqaqa@mail.ru;
Artem R. Khakimov¹,
Ph.D. student (Eng.), junior researcher,
e-mail: arty.hv@gmail.com;

Aleksey V. Shkirin²,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: avshkirin@mephi.ru;
Sergey S. Yurochka¹,
junior researcher, e-mail: yurochkaSR@gmail.com;
Dmitriy N. Ignatenko²,
Ph.D. student (Eng.), acting junior researcher,
e-mail: dmitriyek13104@yandex.ru



¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. The development of dairy farming proves to require technologies for rapid and non-destructive analysis of milk quality. It is noted that optical methods do not negatively affect dairy products. It is noted that farms may get the desired technology by upgrading milking machines with a flow-through device for milk quality express analysis. (*Research purpose*) To study the effect of upgrading the milking machine with a flow-through device for milk quality express analysis on the flow of the milk-air mixture in the milk hose. (*Materials and methods*) For this purpose the SolidWorks simulation modeling was used. Both the developed device and the simulation model are made in cylindrical geometry to ensure their compatibility with the milk hoses of 14 millimeters in diameter. The measurement took into account the angular distribution of light scattered by milk flowing inside an optically transparent cylindrical glass tube. The flow of the milk-air mixture was affected only by a change in the inner diameter of the milk tubes. (*Results and discussion*) It is noted that the simulation model demonstrates an increase in the flow rate of the milk-air mixture in the areas of flow transition between the milk hose and the fitting (to a smaller internal diameter), as well as between the fitting and the measuring chamber of the device (to a larger internal diameter). The mirror result is recorded at the flow outlet from the measuring chamber to the nozzle and the transition from the nozzle to the milk hose. (*Conclusions*) It is found that the use of the device results in a 14 percent increase in the average flow rate of 0.3-0.7 meters per second. It is determined that due to the incomplete filling of the milk hose during milking, the difference in the flow rates of the milk-air mixture before and when applying the device does not have any adverse impact on the milking machine operation. The feasibility of upgrading the milking machine with a flow-through device for milk quality express analysis is proved.

Keywords: dairy farm, digitalization, simulation modeling, milk quality analysis, a flow-through device.

■ **For citation:** Pavkin D.Yu., Khakimov A.R., Shkirin A.V., Yurochka S.S., Ignatenko D.N. Modelirovanie vliyaniya protochnogo ustroystva analiza kachestva moloka na potok v doil'noy ustanovke [Simulating the influence of a flow-through device for milk quality analysis on the flow rate in the milking machine]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 70-75 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-70-75. EDN QOUWDX.

Для контроля качества продукции молочные фермы все чаще используют высокотехнологичные системы экспресс-анализа, которые постепенно заменяют классические дорогостоящие и трудоемкие инвазивные химические методы [1].

Получение информации о количественном содержании компонентов молока (жира, белков, лактозы, соматических клеток, прогестерона, аминокислот и др.) лежит в основе оценки качества молока, а также диагностики баланса питания и клинического состояния коров [2, 3]. В частности, содержание жира считается основным критерием, определяющим рыночную стоимость молока. Контроль состава молока и длительности доения в режиме реального времени особенно важен для оперативного реагирования на отклонения параметров физиологического состояния животных и своевременной корректировки рационов при снижении удоев [4]. Чтобы избежать значительного падения давления в молочном шланге, применяют специальные анализаторы [5, 6]. Перспективны оптические методы бесконтактной и неразрушающей диагностики, с высокой чувствительностью и скоростью [7-10].

Однако на производстве все еще отправляют пробы молока в специализированные лаборатории. Серьезным недостатком такой практики остается значительная задержка информации о компонентном составе молока, составляющая от нескольких часов до нескольких суток.

Молоко, заполняющее трубку диаметром 10-15 мм, служит многократно рассеивающей средой, так как его оптическая толщина, оцененная по данным о коэффициентах рассеяния и поглощения молока в видимом диапазоне, превышает 10 [11-13]. Фактическое заполнение молочной трубки молоком во время доения никогда не бывает полным, достигая в большинстве случаев не более 2/3 ее объема. Проточное устройство экспресс-анализа качества молока создается с учетом того, что поток молока в доильной установке не равномерный, а представляет собой чередование молочных и воздушных пробок [14].

Возможность модернизации доильных установок устройством для измерения отдельных параметров молока повысит технологическую оснащенность и эффективность управления молочными фермами. Чтобы провести модернизацию доильной установки проточным устройством экспресс-анализа качества молока, достаточно гибкого молочного шланга внутренним диаметром 14 мм, расположенного вертикально. Тип доильной установки и количество мест в ней не имеют значения, поскольку можно установить столько устройств, сколько мест в этой установке.

Негативным фактором для работы модифицированной доильной установки может стать сильное вибрационное воздействие, влияющее на точность работы анализатора качества молока, однако вероятность таких условий незначительна.

Для нашего исследования была смоделирована

распространенная доильная система «Елочка», использующая вакуумную линию в 47 ± 1 кПа.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – изучение влияния проточного устройства экспресс-анализа качества молока на поток молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге доильной установки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Устройство выполнено в цилиндрической геометрии для совместимости с молочными шлангами диаметром 14 мм. Его действие основано на измерении углового распределения света, рассеянного молоком, протекающим внутри оптически прозрачной цилиндрической стеклянной трубки. Лазерный диод работает на видимой длине волны, совместно с аксиальной фотодиодной матрицей. Работа устройства не зависит от типа доильной установки и требует только наличия молочного шланга диаметром 14 мм и возможности установки устройства в вертикальном положении (*рис. 1*).

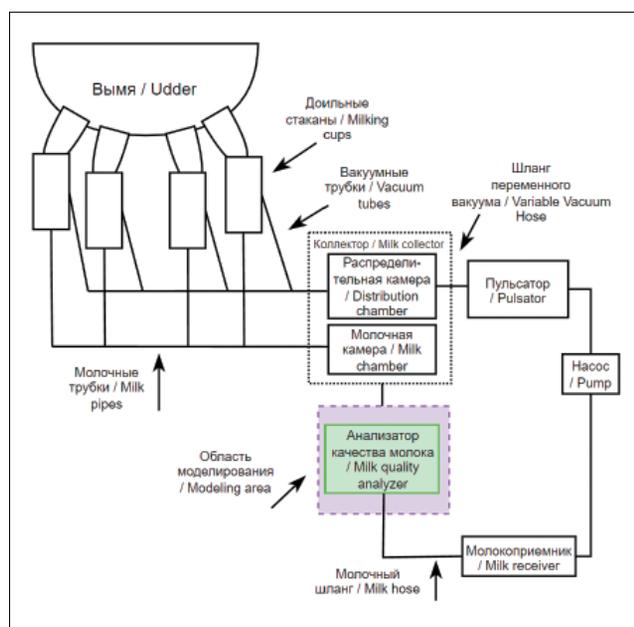


Рис. 1. Расположение области моделирования

Fig. 2. The simulation area

Для исследования создана трехмерная имитационная модель устройства экспресс-анализа качества молока в программе *SolidWorks*. У созданной модели заданы физические параметры молочного шланга, штуцеров и измерительной камеры устройства, а также показатели молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге. Молочный шланг имеет внутренний диаметр 14 мм и длину 200 мм, штуцеры – 10 и 43 мм, измерительная камера – 13 и 21 мм соответственно.

Поток молоковоздушной смеси задан турбулентным, с ежесекундным объемом $0,0001 \text{ м}^3/\text{с}$ (соответствует 6 л/мин). Известно, что скорость движения газа в потоке выше, чем скорость жидкости [15]. Математический расчет плотности молоковоздушной сме-

си $\rho_{см}$ определяется из выражения истинной плотности смеси [15]:

$$\rho_{см} = \rho_{в}\varphi + \rho_{м}(1 - \varphi), \quad (1)$$

где φ – коэффициент истинного газосодержания потока;

$\rho_{см}$ – истинная плотность молоковоздушной смеси, $\text{г}/\text{см}^3$;

$\rho_{в}$ – плотность воздуха, $\text{г}/\text{см}^3$;

$\rho_{м}$ – плотность молока, $\text{г}/\text{см}^3$.

Поток молоковоздушной смеси смоделирован с неполным и неравномерным заполнением молочного шланга, что соответствует реальной ситуации в доильной установке.

Движение молоковоздушной смеси по молочному шлангу описывается системой дифференциальных уравнений [15]:

$$T_{м}SQ_{м} + Q_{м} = k_{м}\Delta p;$$

$$T_{в}SQ_{в} + Q_{в} = k_{в}\Delta p, \quad (2)$$

где $T_{м}$, $T_{в}$ – постоянные времени, с;

$Q_{м}$ и $Q_{в}$ – объемный расход молока и воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

Δp – разность давлений, под действием которой происходит транспортировка молока и воздуха, кПа;

$k_{м}$, $k_{в}$ – коэффициенты усиления.

Оптическое устройство не инвазивное, для измерений не требуется физического контакта с потоком молока. Влияние на скорость потока в молочном шланге возможно только в том случае, если различаются внутренние диаметры молочного шланга, штуцеров и измерительной камеры.

Моделирование применимо для любых других оптических измерительных устройств тех же физических размеров. Для доильных установок с отличающимися данными в созданной модели необходимо изменять задаваемые параметры источника молоковоздушной смеси: объемный расход молока и воздуха, разность давлений, под действием которой происходит транспортировка молока и воздуха, и диаметр молочного шланга.

Основная задача моделирования – выяснить, различается ли скорость потока молоковоздушной смеси в молочном шланге до и после проточного устройства экспресс-анализа качества молока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В процессе моделирования мы создавали максимально близкий к реальному поток молоковоздушной смеси с неполным заполнением молочного шланга (*рис. 2*). Исследованная имитационная модель продемонстрировала увеличение скорости потока молоковоздушной смеси при переходе между молочным шлангом и штуцером (на меньший внутренний диаметр), а также между штуцером и измерительной камерой устройства (на больший внутренний диаметр). Зеркальный результат – при выходе потока из измерительной камеры в штуцер и переходе из штуцера в молочный шланг.

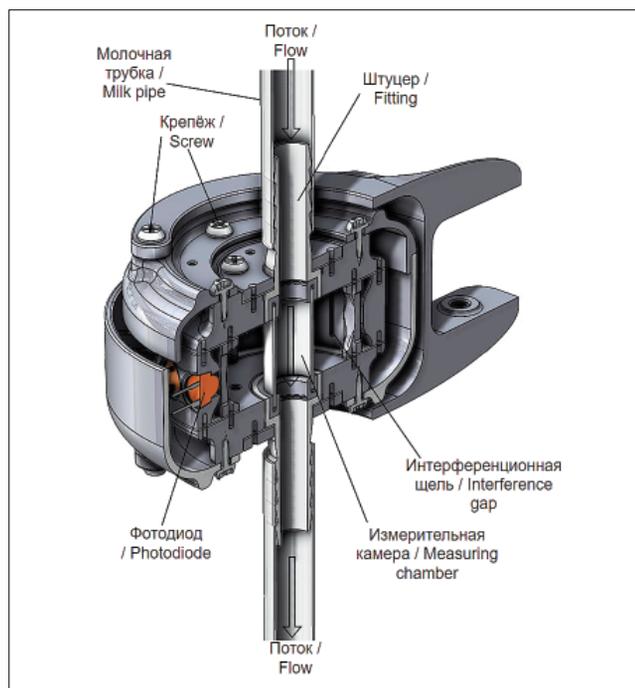


Рис. 2. Модель устройства экспресс анализа качества молока
Fig. 2. Model of the device for milk quality express analysis

Для удобства рассмотрения процесс протекания молоковоздушной смеси разделен на четыре фазы (рис. 3).

Фаза I соответствует началу заполнения молочного шланга и такту сосания доильных стаканов. В этот момент средняя доля молока в молоковоздушной смеси < 5%.

В фазе II повышается доля молока в молочном шланге и, соответственно, в штуцерах и измерительной камере. При этом в зоне перехода между молочным шлангом и штуцером этот показатель составляет < 95%, а в измерительной камере < 40%.

Фаза III демонстрирует максимальное заполнение молоковоздушной смесью: шланга – на 15-40%, об-

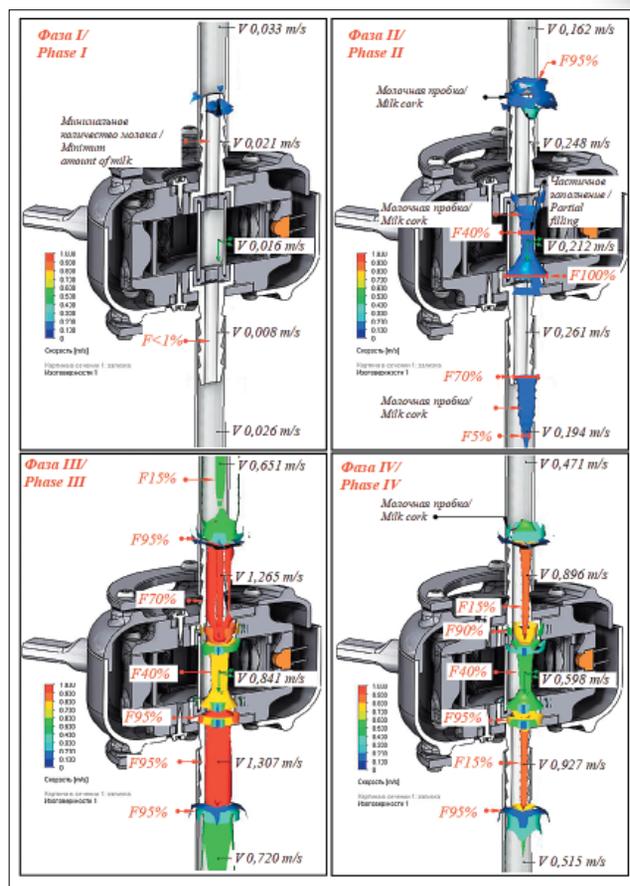


Рис. 3. Скорость потока при различном заполнении молоковоздушной смеси

Fig. 3. Flow rate at different filling of the hose with the milk-air mixture

ласти соединения молочного шланга и штуцера – до 95%, самого штуцера – на 70%. Измерительная камера устройства заполняется на 40%, область соединения между измерительной камерой и штуцером стороны выхода – до 95%.

Фаза IV показывает момент снижения заполнения

Таблица		Влияние устройства на скорость потока / INFLUENCE OF THE DEVICE ON THE FLOW RATE			Table	
№ итерации iteration	Скорость потока, м/с / Flow rate, m/s		Разница скоростей потока / Flow rate difference			
	до устройства before using the device	после устройства when using the device	м/с / m/s	%		
1	0,033	0,026	-0,007	-27		
2	0,048	0,045	-0,003	-7		
3	0,162	0,194	0,032	20		
4	0,258	0,341	0,083	32		
5	0,283	0,374	0,091	32		
6	0,302	0,343	0,041	14		
7	0,354	0,415	0,061	17		
8	0,471	0,515	0,044	9		
9	0,503	0,619	0,116	23		
10	0,596	0,659	0,063	11		
11	0,651	0,720	0,069	11		

молоковоздушной смеси: штуцеров – до 15%, измерительной камеры – до 30-40%. Близкое к полному заполнение сохраняется в областях перехода между штуцерами и молочным шлангом и между штуцерами и измерительной камерой.

Как мы выяснили выше, измеримое влияние проточного устройства экспресс-анализа качества молока на поток молоковоздушной смеси проявляется в разнице скоростей потока ΔV (таблица).

Числовое определение влияния можно представить выражением:

$$\Delta V = V_n - V_d, \quad (3)$$

где V_n – скорость потока после устройства, м/с;

V_d – скорость потока до устройства, м/с.

Как видно из таблицы, при повышении скорости потока молоковоздушной смеси разница скоростей до и после устройства снижается. При скоростях потока выше 0,3 м/с разница скоростей в среднем равна 14%. Наличие устройства повышает скорость потока потому, что внутренние диаметры штуцеров и изме-

рительной камеры меньше, чем у молочного шланга. Однако, поскольку заполнение молочного шланга остается неполным, поток протекающей в молочном шланге молоковоздушной смеси не нарушен.

Выводы. Создана имитационная модель для исследования влияния проточного устройства экспресс-анализа качества молока на скорость потока молоковоздушной смеси. В модели реализованы типовой молочный шланг доильной установки (с внутренним диаметром 14 мм), штуцеры (10 мм), измерительная камера (13 мм), а также источник-генератор молоковоздушной смеси.

Выявлено изменение скорости потока молоковоздушной смеси. Если она выше 0,3 м/с, то после устройства этот показатель возрастает на 14%. Поскольку молочный шланг заполнен не полностью, изменение скорости не нарушает движения потока молоковоздушной смеси, то есть не влияет на работу доильной установки. Поэтому модернизация доильной установки проточным устройством экспресс-анализа качества молока возможна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Burmistrov D.E., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Ignatenko D.N., Nikitin E.A., Lednev V.N., Lobachevsky Y.P., Gudkov S.V., Zvyagin A.V. Application of Optical Quality Control Technologies in the Dairy Industry: An Overview. *Photonics*. 2021. N8. 551.
- Mengüç M., Manickavasagam S. Characterization of size and structure of agglomerates and inhomogeneous particles via polarized light. *International journal of engineering science*. 1998. Vol. 36. N12-14. 1569-1593.
- Kolokolova L., Kimura H., Ziegler K., Mann I. Light-scattering properties of random-oriented aggregates: Do they represent the properties of an ensemble of aggregates? *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006. Vol. 100. N1-3. 199-206.
- Павкин Д.Ю., Хакимов А.Р., Владимиров Ф.Е., Юрочка С.С. Влияние субклинического и клинического мастита на процесс молокоотдачи коров ярославской породы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N3. С. 62-66.
- He C., He H., Chang J., Chen B., Ma H., Booth M.J. Polarization optics for biomedical and clinical applications: a review. *Light: Science & Applications*. 2021. 10. N1. 1-20.
- Ghosh N., Vitkin A. I. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook. *Journal of biomedical optics*. 2011. Vol. 16. N11. 110801.
- Li P., Peng M., Yin X., Ma Z., Dong G., Zhang Q., Qiu J. Temperature dependent red luminescence from a distorted Mn⁴⁺ site in CaAl₄O₇: Mn⁴⁺. *Optics Express*. 2013. Vol. 21. N16. 18943-18948.
- Ramella-Roman J.C., Saytashev I., Piccini M. A review of polarization-based imaging technologies for clinical and pre-clinical applications. *Journal of Optics*. 2020. Vol. 22. N12. 123001.
- He H., Liao R., Zeng N., Li P., Chen Z., Liu X., Ma H. Mueller matrix polarimeter – an emerging new tool for characterizing the microstructural feature of complex biological specimen. *Journal of Lightwave Technology*. 2019. 37. N11. 2534-2548.
- Tuchin V. V. Polarized light interaction with tissues. *Journal of biomedical optics*. 2016. 21. N7. 071114.
- Liu T., Sun T., He H., Liu S., Dong Y., Wu J., Ma H. Comparative study of the imaging contrasts of Mueller matrix derived parameters between transmission and backscattering polarimetry. *Biomedical Optics Express*. 2018. N9. 4413-4428.
- Jiao S., Yu W., Stoica G., Wang L. V. Multiple-channel Mueller-matrix optical coherence tomography in biological tissue. *IEEE*. 2002. 11.
- Chue-Sang J., Bai Y., Stoff S., Straton D., Ramaswamy S. D., Ramella-Roman J. C. Use of combined polarization-sensitive optical coherence tomography and Mueller matrix imaging for the polarimetric characterization of excised biological tissue. *Journal of Biomedical Optics*. 2016. 21. N7. 071109.
- Kirsanov V.V., Shkirin A.V., Pavkin D.Y., Ignatenko D.N., Danielyan, G.L., Khakimov A.R., Bunkin, N.F. Laser Fluorescence and Extinction Methods for Measuring the Flow and Composition of Milk in a Milking Machine. *Photonics*. 2021. N8. 390.
- Мамаев В.А. Движение газожидкостных смесей в трубах. М.: Недра. 1978. 240 с.

REFERENCES

- Burmistrov D.E., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Ignatenko D.N., Nikitin E.A., Lednev V.N., Lobachevsky Y.P., Gudkov S.V., Zvyagin A.V. Application of Optical Quality Control Technologies in the Dairy Industry: An Overview. *Photonics*. 2021. N8. 551 (In English).
- Mengüç M., Manickavasagam S. Characterization of size and structure of agglomerates and inhomogeneous particles via polarized light. *International journal of engineering science*. 1998. Vol. 36. N12-14. 1569-1593 (In English).
- Kolokolova L., Kimura H., Ziegler K., Mann I. Light-scattering properties of random-oriented aggregates: Do they represent the properties of an ensemble of aggregates? *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006. Vol. 100. N1-3. 199-206 (In English).
- Pavkin D.Yu., Khakimov A.R., Vladimirov F.E., Yurochka S.S. Vliyanie subklinicheskogo i klinicheskogo mastita na protsess molokootdachi korov yaroslavskoy porody [Research into the influence of clinical and subclinical mastitis on the milk flow rate of the Yaroslavl breed cows]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 62-66 (In Russian).
- He C., He H., Chang J., Chen B., Ma H., Booth M.J. Polarisation optics for biomedical and clinical applications: a review. *Light: Science & Applications*. 2021. 10. N1. 1-20 (In English).
- Ghosh N., Vitkin A. I. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook. *Journal of biomedical optics*. 2011. Vol. 16. N11. 110801 (In English).
- Li P., Peng M., Yin X., Ma Z., Dong G., Zhang Q., Qiu J. Temperature dependent red luminescence from a distorted Mn⁴⁺ site in CaAl₄O₇: Mn⁴⁺. *Optics Express*. 2013. Vol. 21. N16. 18943-18948 (In English).
- Ramella-Roman J.C., Saytashev I., Piccini M. A review of polarization-based imaging technologies for clinical and pre-clinical applications. *Journal of Optics*. 2020. Vol. 22. N12. 123001 (In English).
- He H., Liao R., Zeng N., Li P., Chen Z., Liu X., Ma H. Mueller matrix polarimeter – an emerging new tool for characterizing the microstructural feature of complex biological specimen. *Journal of Lightwave Technology*. 2019. 37. N11. 2534-2548 (In English).
- Tuchin V.V. Polarized light interaction with tissues. *Journal of biomedical optics*. 2016. 21. N7. 071114 (In English).
- Liu T., Sun T., He H., Liu S., Dong Y., Wu J., Ma H. Comparative study of the imaging contrasts of Mueller matrix derived parameters between transmission and backscattering polarimetry. *Biomedical Optics Express*. 2018. N9. 4413-4428 (In English).
- Jiao S., Yu W., Stoica G., Wang L. V. Multiple-channel Mueller-matrix optical coherence tomography in biological tissue. *IEEE*. 2002. 11 (In Russian).
- Chue-Sang J., Bai Y., Stoff S., Straton D., Ramaswamy S. D., Ramella-Roman J. C. Use of combined polarization-sensitive optical coherence tomography and Mueller matrix imaging for the polarimetric characterization of excised biological tissue. *Journal of Biomedical Optics*. 2016. 21. N7. 071109 (In English).
- Kirsanov V.V., Shkirin A.V., Pavkin D.Y., Ignatenko D.N., Danielyan, G.L., Khakimov A.R., Bunkin, N.F. Laser Fluorescence and Extinction Methods for Measuring the Flow and Composition of Milk in a Milking Machine. *Photonics*. 2021. N8. 390 (In English).
- Mamaev V.A. Dvizhenie gazozhidkostnykh smesey v trubakh [The movement of gas-liquid mixtures in pipes]. Moscow: Nedra. 1978. 240 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Павкин Д.Ю. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;

Хакимов А.Р. – литературный анализ, разработка имитационной модели, обработка результатов исследования, формирование текста и визуализация;

Шкирин А.В. – научное руководство, разработка имитационной модели;

Игнатенко Д.Н. – разработка имитационной модели, визуализация;

Юрочка С.С. – разработка имитационной модели, обработка результатов исследования.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Pavkin D.Yu. – scientific supervision, formulation of the main research concept;

Khakimov A.R. – literature review, development of a simulation model, processing of the research results, text formation and visualization;

Shkirin A.V. – scientific supervision, development of a simulation model;

Ignatenko D.N. – development of a simulation model, visualization;

Yurochka S.S. – development of a simulation model, processing of the research results, visualization;

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

13.02.2023

06.03.2023