

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.223.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
ИМ. А.М. ПРОХОРОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»,
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 09 декабря 2024 г. № 19

О присуждении Игнатенко Дмитрию Николаевичу, гражданину РФ,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Анализ дисперсного состава сильнонаправляющих сред методами лазерной диагностики» по специальности 1.3.19. Лазерная физика принята к защите 30 сентября 2024 г. (протокол заседания № 17) диссертационным советом 24.1.223.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (119991 ГСП-1, Москва, ул. Вавилова, д. 38, приказ о выдаче разрешения на создание совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» от 12.12.2023 г. № 2290/нк).

Соискатель Игнатенко Дмитрий Николаевич, 15 ноября 1995 года рождения. В 2019 году соискатель окончил специалитет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по направлению 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей». В 2024 году соискатель окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия» по специальности 1.3.19. (01.04.21) Лазерная физика.

Соискатель работает в должности исполняющего обязанности младшего научного сотрудника Центра биофотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова

Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в Центре биофотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (ИОФ РАН им. А.М. Прохорова).

Научный руководитель — Гудков Сергей Владимирович, доктор биологических наук, профессор, профессор РАН, руководитель Центра биофотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (ИОФ РАН им. А.М. Прохорова).

Официальные оппоненты:

Олейников Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом биоматериалов и бионанотехнологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Государственный Научный Центр Российской Федерации Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова Российской академии наук (ИБХ РАН)

Чайков Леонид Леонидович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией Комбинационного рассеяния света Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

дали положительные отзывы о диссертации со следующими замечаниями:

1. Замечания Олейникова В.А.:

- 1) Первая глава выглядит диспропорциональной. Очень большой объём посвящён спектрофотометрическим методам диагностики молочной продукции и кормов, которые в дальнейшей работе никак не задействованы.
- 2) Значительный объём второй главы посвящён лазер-поляриметрической скаттерометрии.
- 3) Вдобавок к стандартному методу статистической обработки для оценки экспериментальных данных, основанному на вычислении среднего и дисперсии, стоило бы применить критерий ANOVA, широко распространённых в биологических исследованиях для анализа различий между группами данных.

4) Ссылки на литературу оформлены по более старому стандарту ГОСТ.

2. Замечания Чайкова Л.Л.:

1) В разделе «Научная новизна» ни разу не встречаются слова «впервые» и «новый», хотя, как сказано в начале отзыва, в работе впервые экспериментально показаны некоторые зависимости, на основе которых предложены и реализованы новые методы анализа дисперсных сильно-рассеивающих сред и создан новый прибор. Кроме того, диссертант почему-то не указал в «Новизне» введение нового параметра Y — меры изменения наклона индикатрисы, которого я не встречал в литературе.

2) Во второй главе отсутствует пояснение, почему выбран метод решения обратной задачи именно методом разложения в линейную комбинацию «каналов», т.е. размерно-вещественных компонентов. Стоило бы пояснить, были ли альтернативные методы решения.

3) На рис. 2.11 на стр. 78 по оси абсцисс отложена величина Y , а описание этой величины (характеристической функции датчика) дано только в следующей главе, на стр. 90.

4) В подписи к рис. 3.5 должна, по-видимому, фигурировать формула (36), а не (38).

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет просвещения», г. Москва, в своем положительном заключении, подписанным Виктором Васильевичем Беляевым, доктором технических наук, профессором, профессором кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии физико-математического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет просвещения» и утвержденным проректором по научной работе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет просвещения» доктором медицинских наук, доцентом Куликовым Д.А., указала, что диссертация Игнатенко Дмитрия Николаевича на тему «Анализ дисперсного состава сильно-рассеивающих сред методами лазерной диагностики», представленная к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика, является законченной научно-квалификационной работой. По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов представленная работа соответствует требованиям п. 9, 10, 11, 13, 14 Положения «О присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор заслуживает присуждения ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика. К диссертационной работе были предъявлены следующие замечания:

- 1) Структура первой главы недостаточно оптимальна. Имело бы смысл расположить раздел с описанием оптических методов в самом начале.
- 2) Не представлен список сокращений.
- 3) На стр.82 указывается на вероятность наличия мастита при значительной концентрации соматических клеток, обнаруживаемой используемым лазерным методом. На самом деле такая диагностика зависит и от комплекса других параметров, не описываемых в диссертации.
- 4) Во второй главе не показано влияние физических параметров объекта исследования, кроме размера, на моделируемые и измеряемые зависимости.
- 5) В третьей главе не объяснено, как именно подбирались уравнения составной функции для аппроксимации результатов измерения флуоресценции.
- 6) Большой разброс размеров иллюстраций, нет унификации.
- 7) Слишком большой интервал между заголовками и основным текстом.

Отмеченные недостатки носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку работы. Ее результаты несомненно представляют научную и практическую ценность.

Соискатель имеет 12 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 8 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 8 работ. Все они входят в международные базы Web of Science и Scopus. В рецензируемых научных изданиях опубликовано 8 работ по лазерной диагностике сильно рассеивающих сред, в которых соискатель принял непосредственное участие при проведении экспериментов, обработке экспериментальных данных и написании публикаций. На базе разработанных методов и устройств созданы объекты интеллектуальной собственности, защищенные патентами РФ в количестве 1 шт. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Список наиболее значительных работ:

1. 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* **8**, 390. (2021).

2. Shkirin, A. V., **Ignatenko, D. N.**, Chirikov, S. N., Bunkin, N. F., Astashev, M. E., Gudkov, S. V. Analysis of Fat and Protein Content in Milk Using Laser Polarimetric Scatterometry. *Agriculture* **11**, 1028 (2021).
3. 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* **8**, 551 (2021).
4. **Ignatenko, D. N.**, Shkirin, A. V., Lobachevsky, Y. P., Gudkov, S. V. Applications of Mueller Matrix Polarimetry to Biological and Agricultural Diagnostics: A Review. *Appl. Sci.* **12**, 5258 (2022).
5. Shkirin, A. V., Astashev, M. E., **Ignatenko, D. N.**, Suyazov, N. V., Vedunova, M. V., Gudkov, S. V. Laser Scatterometric Device for Inline Measurement of Fat Percentage and the Concentration Level of Large-Scale Impurities in Milk. *Appl. Sci.* **12**, 12517 (2022).
6. Shkirin, A. V., Astashev, M. E., **Ignatenko, D. N.**, Suyazov, N. V., Chirikov, S. N., Kirsanov, V. V., Pavkin, D. Y., Lobachevsky, Y. P., Gudkov, S. V. A Monoblock Light-Scattering Milk Fat Percentage and Somatic Cell Count Sensor for Use in Milking Systems. *Sensors* **23**, 8618 (2023).
7. Khakimov, A. R., Dorokhov, A. S., Pavkin, D. Y., Yurochka, S. S., Shkirin, A. V., Astashev, M., **Ignatenko, D. N.**, Izmailov, A. Y., Gudkov, S. V. Effects of Milking System Operating Conditions on the Milk-Fat-Percentage Measuring Accuracy of an Inline Light-Scattering Sensor. *Appl. Sci.* **13**, 11836 (2023).
8. Shkirin, A., Chirikov, S., Suyazov, N., Astashev M. E., **Ignatenko D. N.**, Gudkov S.V. Detection of Somatic Cells in Milk Using Laser Light Scattering. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **51**, 174–180 (2024).

На автореферат поступили 2 отзыва; все отзывы положительные, но есть замечания:

1. От Ивлеева Павла Алексеевича, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры ФН-4 «Физика», учёного секретаря НУК ФН Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана):
 - 1) В тексте автореферата приводится мало подробностей о технических характеристиках построенных автором экспериментальных стендов и датчиков.
2. От Стасенко Сергея Викторовича, кандидата физико-математических наук, доцента, доцента кафедры нейротехнологий Института биологии и биомедицины, старшего научного сотрудника научно-

исследовательской лаборатории стохастических мультистабильных систем Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ им. Н.И. Лобачевского):

- 1) В части, посвящённой исследованию поляриметрии, не учитывается возможное двулучепреломление в стекле.
- 2) Там же не обоснован выбор метода решения обратной задачи.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой степенью их компетенции в вопросах лазерной физики, подтвержденной большим числом публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, что позволяет им оценить достоверность полученных результатов и научно-практическую значимость рассматриваемой в диссертации проблемы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработана новая методика комбинирования флуоресценции и скаттерометрии, позволяющая осуществлять компонентную диагностику сильнорассеивающих дисперсных сред. В частности, данная методика позволила одновременно измерять содержание жира, белка и соматических клеток в движущемся потоке газо-молочной смеси, что было реализовано впервые.

Предложен новый подход к определению компонентного состава сильнорассеивающих сред на примере молока, показывающий, что нормированный наклон индикатрисы напрямую зависит от жирности, независимое определение содержания жира и соматических клеток возможно в диапазонах углов бокового и прямого рассеяния соответственно, а определение содержания молочного белка возможно по измерению интенсивности флуоресценции при учёте ранее измеренной с помощью скаттерометрии жирности.

Доказано, что новый комбинированный флуоресцентно-скаттерометрический метод может найти применение в разработке перспективных флуоресцентно-скаттерометрических приборов, которые могут найти применение при решении широкого спектра прикладных задач, в частности в рамках биомедицины и сельского хозяйства.

Предложена имитационная модель светорассеяния в дисперсных системах на основе метода конечных элементов.

Разработаны регрессионная модель зависимости светорассеяния от жирности и математический аппарат определения содержания молочного белка по интенсивности флуоресценции.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Доказано, что диспергированные компоненты сильно-рассеивающих сред в зависимости от размера и содержания по-разному влияют на индикатрису светорассеяния. В случае молока установлено, что жирность и содержание соматических клеток влияют на форму индикатрисы в определённых диапазонах углов.

В рамках диссертационного исследования **использованы** широко используемые методы статистической обработки данных, подтвердившие достоверность полученных результатов. Эксперименты проводились как на экспериментальных стендах, принцип работы которых основан на впервые разработанном комбинированном флуоресцентно-скаттерометрическом методе, так и на специализированном лабораторном оборудовании, в частности, на спектрофлуориметре JASCO FP-8300P.

Изложены следующие положения: нормированный наклон индикатрисы светорассеяния является чувствительным к жирности параметром, крупномасштабные примеси существенно искажают индикатрису только в диапазоне углов прямого рассеяния ($0-36^\circ$), пики флуоресценции молочного белка (казеина) и других компонентов молока не пересекаются, что позволяет определять содержание белка по интенсивности флуоресценции на конкретной длине волны возбуждения флуоресценции.

Показано, что результаты имитационного моделирования на основе метода конечных элементов в сочетании с методом Монте-Карло качественно соответствуют результатам экспериментов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Разработан макет флуоресцентно-скаттерометрического датчика, способного определять одновременно содержание жира, белка и соматических клеток в движущемся потоке газо-молочной смеси.

Проведены испытания датчика в составе экспериментального прототипа промышленной доильной установки. Результаты испытаний подтвердили работоспособность разработанного флуоресцентно-скаттерометрического метода.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

В работе показано, что нормированный наклон индикатрисы светорассеяния в модельных дисперсных системах на основе молока является чувствительным к жирности параметром в пределах 0.01-10%, впервые установлена функциональная связь между параметрами формы индикатрисы и жирностью. Впервые экспериментально продемонстрировано, что содержание крупномасштабных примесей (соматических клеток) может быть обнаружено по интенсивности светорассеяния на углах прямого рассеяния ($0-36^\circ$) без существенных отклонений измеренных значений жирности в боковом рассеянии ($72-108^\circ$). Впервые показано, что при учёте заранее измеренной жирности скаттерометрическим методом возможно определение содержания белка путём измерения интенсивности рассеяния флуоресценции при длине волны возбуждения 280 нм. Впервые был разработан комбинированный флуоресцентно-скаттерометрический метод, позволяющий одновременно определять содержание жира, белка и соматических клеток в движущемся потоке газомолочной смеси.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что все выводы диссертации обоснованы и подтверждены данными лабораторных и научных экспериментов, проведенных с применением специально разработанных методик при использовании современного научного оборудования, математического моделирования и специально разработанных экспериментальных стендов. Работы отечественных и зарубежных авторов в области оптической диагностики и, в частности, вопросов применения скаттерометрических и флуориметрических методов компонентной диагностики молочных продуктов легли в основу теоретических и методологических разработок и исследований, представленных в работе. Анализ полученных результатов производился с использованием методов статистической обработки данных.

Личный вклад соискателя состоит в разработке экспериментальных стендов; непосредственном участии соискателя в теоретической проработке методов диагностики дисперсных систем, получении исходных данных и проведении научных экспериментов; выполнении автором обработки и интерпретации экспериментальных данных, подготовке основных публикаций по выполненной работе и их апробация.

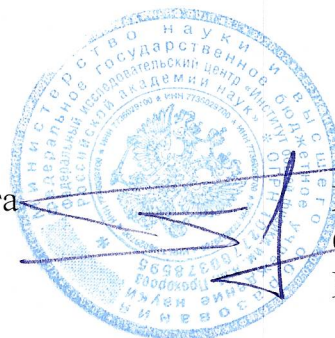
Соискатель Игнатенко Дмитрий Николаевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, замечания ведущей организации и

оппонентов, согласился с некоторыми замечаниями и привёл собственную аргументацию.

На заседании 09 декабря 2024 года диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития лазерной физики и заключающееся в разработке комбинированного флуоресцентно-скаттерометрического метода диагностики сильнорассеивающих сред и технических решений на его основе присудить Игнатенко Дмитрию Николаевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: «за» 13, «против» 0, недействительных бюллетеней 2.

Председатель диссертационного совета
член-корреспондент РАН



Гарнов
Сергей
Владимирович

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Осадчий
Александр
Валентинович

10 декабря 2024 г.