

**ОТЗЫВ**  
официального оппонента  
доктора физико-математических наук Олейникова Владимира Александровича  
на диссертацию Игнатенко Дмитрия Николаевича  
**«Анализ дисперсного состава сильнорассеивающих сред методами лазерной  
диагностики»,**  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертационная работа Игнатенко Дмитрия Николаевича посвящена экспериментальному исследованию применения методов лазерной диагностики для определения компонентного состава сильнорассеивающих дисперсных сред. Исследования проводились на молоке как примере сложной биоорганической дисперсной системы. В рамках проведённого исследования представлен комбинированный флуоресцентно-скаттерометрический метод, позволяющий одновременно определять процентное содержание жира, молочного белка (казеина) и крупномасштабных примесей (соматических клеток) в движущемся потоке газомолочной смеси. Результаты диссертационной работы являются оригинальными и актуальными, в частности, в рамках биомедицинских и сельскохозяйственных приложений. Так на основе результатов работы был реализован прототип проточного флуоресцентно-скаттерометрического датчика, устанавливаемого в доильные системы.

**Актуальность работы** определяется потребностью в надёжных и недорогих методиках определения компонентного состава диспергированных сред. Несмотря на то, что дисперсные системы являются довольно распространённым объектом исследований, например, в промышленном производстве или медицине, проблемы анализа их характеристик всё ещё актуальны. Особенно это касается сильнорассеивающих сред, анализ которых затруднён их свойствами. Частным случаем является молочная промышленность, где раннее определение компонентного состава, в особенности обнаружение нежелательных примесей, является важной частью процесса контроля качества.

**Степень обоснованности** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, очень высока. Так, в связи с эффектом многократного рассеяния, реакция индикаторы может зависеть только от содержания в среде достаточно крупных рассеивателей, в случае молока — это мицеллы жира и крупномасштабные примеси, такие как соматические клетки. Аналогичные результаты показали результаты имитационного моделирования. Возможность определения процентного содержания казеина по флуоресценции является обоснованной, так как результаты измерений флуоресценции показывают, что пики эмиссии компонентов не перекрываются.

**Достоверность** выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений. Это подтверждается как большим количеством информативно поданных экспериментальных данных с применением самостоятельно разработанной приборной базы и высокоточного лабораторного оборудования, так и результатами математического моделирования, результаты которого согласуются с результатами экспериментов.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения с перечислением основных результатов работы и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 157 страниц, включая 49 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 260 наименований.

Во **введении** определены цель работы и конкретные задачи, необходимые для её достижения. Обосновывается актуальность и научная новизна работы, а также формулируются основные защищаемые положения. Далее представлены полученные результаты исследования, а также их практическая значимость. Перечислены основные публикации и доклады, выполненные по теме работы.

В **первой главе** диссертации представлен обзор литературы, посвященный широкому спектру применений оптической диагностики, особенно в сельском хозяйстве. Глава состоит из двух частей: вводной и заключительной. В первой части после краткого введения описывается состояние рынка молочной продукции, обосновывается необходимость применения оптических систем для диагностики и контроля качества. Затем представлены три раздела, посвященные обзору разнообразных оптических методов исследования, применению оптических методов при диагностике молочных продуктов и применению оптических методов диагностики при изучении кормов. Значительное внимание уделяется спектрометрическим методам, основанным на измерениях в ближнем инфракрасном, среднем инфракрасном диапазонах и спектрометрии в ИК-диапазоне с преобразованием Фурье, а также описываются сложности их использования. В заключительной части главы проводится оценка оптических методов как точного инструмента диагностики и рассматриваются их перспективы. В частности, делается вывод о высокой актуальности портативных аналитических приборов для быстрого экспресс-анализа.

**Вторая глава** диссертации посвящена анализу методов лазерной диагностики, в частности, лазерно-люминесцентной спектрометрии, лазерной экстинкции и лазерно-поляриметрической скаттерометрии. Обосновывает выбор данных методов, делается акцент на необходимости проведения диагностики в условиях движущегося потока. Приводится подробное описание каждого из упомянутых методов диагностики, анализируются их преимущества и недостатки. Значительная часть главы посвящена описанию лазерно-поляриметрического метода, который позволяет не только определять процентное содержание жира и белка, но и анализировать размеры их мицелл и агрегатов. Это достигается благодаря способности матрицы Мюллера реагировать на содержание компонентов молока (матрица отражает состояние поляризации рассеянного света, а решение обратной задачи позволяет определять размеры компонентов по коэффициентам их вклада в рассеяние). Важное заключение по лазер-поляриметрической скаттерометрии: индикатриса светорассеяния зависит от жирности в диапазоне от 0-10% независимо от состояния поляризации.

В **третьей главе** диссертации приводится исследование комбинированного флуоресцентно-рассеивающего метода. Монотонная зависимость индикатрисы светорассеяния от жирности подтверждает возможность метода определять содержание жира. В качестве информативного параметра для определения жирности предлагается использовать нормированный наклон индикатрисы рассеяния, позволяющий исключать

внешние факторы, искажающие результаты измерения индикатрисы. Для приведения к функциональной зависимости индикатрисы от жирности была проведена линеаризация характеристической кривой нормированного наклона. Крупномасштабные примеси (соматические клетки) существенно искажают картину светорассеяния только в прямом рассеянии ( $0\text{-}36^\circ$ ). Это значит, что возможна раздельная регистрация на фиксированных углах соматических клеток и мицелл жира ( $72\text{-}108^\circ$ ). Введённый индекс крупных частиц позволяет отслеживать превышение содержания соматических клеток относительно нормы в  $10^5 \text{ см}^{-3}$ . Результаты экспериментов подтверждаются результатами моделирования рассеивающей среды. Определение содержания белка осуществляется методом регистрации рассеяния флуоресценции, а именно вычетом из общей картины флуоресценции вклада жировой компоненты при заранее определённом скаттерометрией процентном содержании. Для казеина определена длина волны возбуждения флуоресценции 280 нм.

В **четвёртой главе** представлена разработка прототипа флуоресцентно-скаттерометрического датчика. Проведена оптимизация конструкции прибора, определён состав электронных компонентов, описаны устройство и принцип работы датчика. Представлены результаты работы датчика в составе доильной установки. В заключении главы обсуждаются перспективы совершенствования конструкции, такие как внедрение фотоприёмной матрицы с целью совершенствования возможности определения соматических клеток.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- 1) Проведён анализ методов анализа молока: лазер-люминесцентной спектроскопии, лазерной экстинкции и лазерно-поляриметрической скаттерометрии. Последняя позволяет одновременно определять содержание жира и белка с помощью алгоритма восстановления распределения частиц, тем самым демонстрирует лучшие результаты, однако требует разбавления молока в 1000 раз и обладает недостаточной точностью.
- 2) Исследовано рассеяние лазерного излучения на модельных дисперсных системах, установлена зависимость индикатрисы от содержания жировых мицелл и соматических клеток. Экспериментально подтверждена зависимость наклона индикатрисы светорассеяния от содержания жира в диапазоне  $\sim 0.01\text{-}10\%$ . Введен скаттерометрический параметр, чувствительный к жирности молока в диапазоне 0-10%, и разработана регрессионная модель для калибровки датчика по жирности.
- 3) Показана чувствительность уровня интенсивности на углах, близких к прямому рассеянию, к крупномасштабным частицам. Установлено относительное изменение скаттерометрического параметра на углах прямого рассеяния, обусловленное соматическими клетками, на уровне 0.1% при концентрации клеток  $10^6 \text{ см}^{-3}$ .
- 4) Исследованы спектры флуоресценции компонентов молока, определена оптимальная длина волны возбуждения казеина — 280 нм. Разработан математический аппарат для определения содержания белка по интенсивности флуоресценции с учётом содержания жира по светорассеянию.
- 5) Предложена конструкция датчика, объединяющего измерения рассеяния света и флуоресценции для определения состава молока. Разработаны оптическая и

электронная схемы проточного датчика в цилиндрической геометрии, оснащенного полупроводниковым лазером и УФ-светодиодом с длиной волны 280 нм, а также концентрическим массивом фотодиодов для регистрации индикатрисы и интенсивности флуоресценции молока.

**Научная новизна работы** заключается в разработке комбинированного флуоресцентно-рассеивающего метода для проведения компонентного анализа сложных дисперсных сред, в частности, молока. Установлена зависимость кривизны индикатрисы светорассеяния от концентрации крупных частиц, что позволяет определять состав без предварительной обработки данных. Жирность регистрируется по углам бокового рассеяния, а примеси — по углам прямого рассеяния. Дополнительная регистрация флуоресценции позволяет определять содержание белка. Полученные результаты демонстрируют возможность создания простого и точного прибора для анализа сильно рассеивающих сред.

**Практическая значимость работы** заключается в возможности применения результатов исследования при контроле качества пищевых продуктов, обеспечения безопасности рабочей среды, проведения биологических исследований и анализа газообразных и жидких сред в полевых условиях. Разработаны методы определения компонентов молока в неподвижном и движущемся состоянии, определена зависимость наклона индикатрисы светорассеяния от жирности и выявлен эффект обнаружения жировых мицелл и крупномасштабных примесей на определенных углах рассеяния. Разработан метод прямой регистрации компонентов молока из индикатрисы светорассеяния, а также метод прямой регистрации белка по интенсивности флуоресценции. Результаты исследования послужили основой для разработки прототипов датчиков и могут быть использованы для создания простых и эффективных приборов для экспресс-анализа дисперсного состава биологических сред.

В диссертационной работе можно выделить следующий ряд замечаний:

- 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 распространённый в биологических исследованиях для анализа различий между группами данных.
- 4) Ссылки на литературу оформлены по более старому стандарту ГОСТ.

Несмотря на отдельные замечания, касающиеся некоторых частных аспектов исследования, диссертационная работа в целом оценивается положительно. Она характеризуется актуальностью выбранной темы, оригинальностью полученных результатов, научной обоснованностью и практической значимостью. Проведенные исследования содержат ряд ценных находок, способных внести существенный вклад в развитие соответствующей области знаний и принести ощутимую пользу в практической сфере.

Материалы диссертационной работы полностью отражены в автореферате и опубликованы в отечественных и зарубежных журналах, а также в трудах всероссийских и международных конференций, а также в патенте на изобретение. Работа проиллюстрирована наглядными и информативными материалами. Список цитируемой литературы полностью соответствует теме исследования. Тематика диссертации соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика по физико-математическим наукам.

Диссертационная работа «Анализ дисперсного состава сильнорассеивающих сред методами лазерной диагностики» Игнатенко Дмитрия Николаевича является самостоятельной и завершённой научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и практической ценностью. Работа соответствует всем требованиям всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (ред. от 16.10.2024 г.), предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертационной работы, Игнатенко Дмитрий Николаевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук по специальности 03.00.02. Биофизика, 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

Телефон: +7 (910) 409-84-55

E-mail: [voleinik@mail.ru](mailto:voleinik@mail.ru)

Олейников Владимир Александрович

«01» ноября 2024 г.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный Научный Центр Российской Федерации Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова Российской академии наук (ИБХ РАН), 117997, ГСП-7, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10

Подпись Олейникова В.А. удостоверяю  
Заместитель директора ИБХ РАН,  
д.х.н.

01.11.2024 г.

Ямпольский Илья Викторович