

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 501.508: 551.510

СМУНЁВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПОПУЛЯЦИЙ ЭРИТРОЦИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ И
НЕФЕЛОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – Оптика

Минск, 2016

Работа выполнена в **Белорусском государственном университете.**

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -

КУГЕЙКО Михаил Михайлович,

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой квантовой радиофизики и
оптоэлектроники Белорусского государственного
университета.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КАТКОВСКИЙ Леонид Владимирович,

доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией дистанционной
фотометрии НИУ «Институт прикладных
физических проблем им. А.Н. Севченко»
Белорусского государственного университета;

ДИК Сергей Константинович,

кандидат физико-математических наук, доцент,
первый проректор
УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники».

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова
НАН Беларуси».**

Защита состоится **25 ноября 2016 года в 14.00** часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: *Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.* Телефон ученого секретаря 209-57-09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «___» октября 2016 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук доцент

О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Оптические методы диагностики дисперсных рассеивающих сред делятся на два подкласса: исследование оптического отклика объекта в целом и исследование оптических свойств каждой части объекта. Дисперсную среду можно исследовать по ее светорассеянию как результату взаимодействия всех частиц с посылаемым в среду излучением или добиться того, чтобы каждый элемент среды был отдельно зафиксирован и изучен с точки зрения светорассеяния. Важнейшей задачей, требующей решения в оптических методах, является интерпретация измерительной информации. В методах, где исследуется отклик среды как целого, интерпретация измерительной информации – это наиболее сложный этап. Наличие погрешностей в измерениях делает задачу обращения еще и некорректной. Для решения таких задач, как правило, используют регуляризирующие алгоритмы, что, в свою очередь, требует использования априорной информации для определения коэффициента регуляризации.

Относительно недавно был предложен новый подход к решению обратной задачи оптического зондирования на основе установления регрессионных соотношений между определяемыми параметрами и измеряемыми оптическими характеристиками. Алгоритмы интерпретации измерительной информации в данном подходе основаны на использовании математических моделей рассеивающих частиц. Следует отметить, что в настоящее время интерпретация измерительной информации для указанного выше подхода основана на установлении регрессионных соотношений между измеряемыми спектральными и угловыми оптическими характеристиками (ОХ) и их определяемыми микрофизическими параметрами (МФП) только для сфер или сфероидов.

Многие реальные рассеивающие дисперсные среды состоят из заведомо несферических частиц. Типичным примером такой среды может служить взвесь нативных (естественных, необработанных) эритроцитов, имеющих в реальности форму, наиболее приближенную к двояковогнутому дискоиду. Таким образом, актуальным, с точки зрения повышения достоверности анализа форменных элементов крови (ФЭК), практичным (с учетом отмеченного выше подхода) ввиду перспективы упрощения технологии определения микрофизических параметров, а также ожидаемого эффекта (например, появления новых диагностических параметров – площади поверхности и объема нативного эритроцита), является изучение эритроцитов крови человека в виде двояковогнутых дискоидов.

Важным преимуществом отмеченных методов, основанных на отмеченном выше подходе интерпретации измерительной информации, является возможность проводить измерения в разбавленной или цельной крови, а не на выделенных единичных эритроцитах, пропускаемых последовательно через измерительный канал гематологических анализаторов – кондуктометров или цитометров, возможность автоматизации измерительных устройств и слабая чувствительность к погрешностям измерения оптических характеристик.

Учитывая зависимость интенсивности рассеянного излучения не только от размера и показателя преломления частиц, но и от их ориентации и формы, а также необходимость более адекватного представления эритроцита в виде двояковогнутого дискоида, представляется важным исследовать возможности как поляризационных, так и рассеивающих свойств популяций нативных эритроцитов в методах определения их МФП как по отклику среды как целого, так и каждой части исследуемого объекта. Рассеивающие и поляризационные характеристики эритроцитов, представленных в форме двояковогнутых дискоидов, в методах с использованием регрессионных соотношений в литературе не рассматривались. Рассмотрение данной темы подготовит теоретическую базу для создания эффективного экспресс-анализатора форменных элементов крови, облегчит задачу интерпретации измерительной информации в используемых в настоящее время для анализа крови гематологических анализаторах.

Учет поляризационных свойств позволяет наиболее полно отражать взаимодействие излучения со средой, а представление эритроцита в виде наиболее реалистичной модели двояковогнутого дискоида дает возможность одновременно определять как средние по популяции площадь поверхности и объем, так и параметры функции распределения частиц по размерам и показатель преломления. Площадь поверхности эритроцита, отвечающая за передачу кислорода различным органам человека, не используется в настоящее время в диагностике ФЭК (в эритроцитарных параметрах крови), т.е. может являться новым важным диагностическим параметром в диагностике заболеваний.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, теоретическое обоснование и разработка методов определения МФП, параметров формы популяций нативных эритроцитов на основе установления регрессионных соотношений между определяемыми МФП, параметрами формы и измеряемыми оптическими характеристиками является актуальной задачей, решение которой (по отклику среды как целого, т.е. без выделения отдельных частиц) обеспечит оперативность проведения анализа, одновременное измерение всего комплекса МФП, упрощение и удешевление анализа, повышение точности измерения всех

рассматриваемых параметров. В гематологических анализаторах использование установленных регрессионных соотношений повысит точность, оперативность обработки измерительной информации, упростит процесс ее обработки. Многие проблемы, требующие разрешения в поставленной задаче, до проведенных в диссертации исследований оставались нерешенными или недостаточно изученными.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертационной работы соответствует подразделу 6.1 «Фундаментальные проблемы взаимодействия излучения с неорганическими органическими веществами в разных фазах, в том числе с биологическими тканями, клеточными структурами и организмами», подразделу 6.5 «Физические основы и разработка лазерных, оптико-электронных технологий и приборов, в том числе приборов ночного видения» перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 585 от 19 апреля 2010 г.

Диссертационная работа выполнялась в рамках утвержденных научных тем, выполняемых на кафедре квантовой радиофизики и оптоэлектроники БГУ в 2011–2016 гг.

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, были получены в ходе выполнения научно-технических программ и отдельных тем:

«Методы и алгоритмы оптико-физической диагностики форменных элементов крови на основе регрессионных соотношений между их оптическими и микрофизическими характеристиками», выполняемой в 2010–2012 гг. по договору с Фондом фундаментальных исследований РБ № Ф10М-051, номер госрегистрации 20101555;

«Разработка методов и систем лазерной локации, локального контроля неоднородных аэродисперсных сред на основе корреляционной спектронефелометрии» ГКПНИ «Электроника и фотоника» (*подпрограмма «Фотоника»*), (шифр 2.1.07.1), тема 466/13, 2011–2015 гг., номер госрегистрации 20115601;

«Разработка методов, аппаратных средств и препаратов для оптической диагностики и фототерапии патологических состояний организма с использованием лазерных и светодиодных источников» ГПНИ «Электроника и фотоника» (*подпрограмма «Фотоника»*), (шифр 2.3.05.1), тема 465/13, 2014–2015 гг., номер госрегистрации 20142123;

«Разработка метода неинвазивной экспресс-диагностики онкологических заболеваний органов брюшной полости по спектрометрическим измерениям диффузного рассеяния», выполняемой в 2012–2014 гг. по договору с Фондом фундаментальных исследований РБ и Министерством образования РБ № Ф12МВ-045; номер госрегистрации 20122673.

Цель и задачи исследования

Цель работы заключалась в установлении взаимосвязи между измеряемыми оптическими характеристиками и определяемыми микрофизическими параметрами, параметрами формы (объем и площадь поверхности) эритроцитов крови человека и разработке на данной основе высокоточных экспресс-методов измерения определяемых параметров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать статистическую микрофизическую модель популяций эритроцитов в виде сферы, сфероида, двояковогнутого дискоида, установить функции распределения сфер, сфероидов по размерам, которые обеспечат равенство микрофизических характеристик исходной популяции двояковогнутых дискоидов и аппроксимирующей популяции шаров, сфероидов.

2. Оптимизировать метод расчета оптических характеристик частиц произвольной формы с целью сокращения вычислительного времени, повышения точности.

3. С использованием оптимизированного метода расчета оптических характеристик рассчитать элементы матрицы Мюллера, коэффициенты рассеяния под углом, коэффициенты поляризации, деполаризации оптического излучения для популяций эритроцитов в форме двояковогнутого дискоида, сфероида, сферы.

4. Установить устойчивые регрессионные соотношения между определяемыми микрофизическими параметрами эритроцитов и рассчитанными оптическими характеристиками для широкого диапазона их микрофизических параметров.

5. Оценить влияние математической модели эритроцита на точность определения микрофизических параметров популяции эритроцитов методами с использованием устанавливаемых регрессионных соотношений между определяемыми и измеряемыми параметрами.

6. Установить наиболее эффективные рассеивающие и поляризационные характеристики, требуемые для реализации измерительной процедуры в виде экспресс-метода, позволяющего оперативно и с высокой точностью проводить

измерения без использования ряда дорогостоящих подготовительных процедур как микрофизических параметров популяций нативных эритроцитов, так и параметров формы (объем и площадь поверхности).

Объектом исследования являются полидисперсные рассеивающие среды – популяции эритроцитов крови человека.

Предмет исследования – оптические и микрофизические характеристики популяций эритроцитов крови человека и методы их определения.

Научная новизна

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

- показано, что при расчете оптических характеристик частиц произвольной формы использование объемных диполей в форме прямоугольного параллелепипеда и точечных диполей на прямоугольной сетке требует согласованного применения поляризуемости и расчета дипольного взаимодействия;

- показано, что погрешность методов определения МФП популяций эритроцитов зависит от выбора их математических моделей, используемых для интерпретации измерительной информации, поскольку, например, при сохранении их важнейших микрофизических параметров обеспечивается погрешность определения среднего объема для модели двояковогнутого дискоида $\sim 1\%$, для моделей сплюснутого сфероида и сферы $\sim 8\%$ и $\sim 21\%$ соответственно;

- установлено влияние поляризованного и неполяризованного оптического излучения на точностные характеристики определяемых МФП эритроцитов, представленных в виде сферы, сплюснутого дискоида, двояковогнутого дискоида, показывающее, что поляризационные измерения не приводят к существенному повышению точности определяемых параметров (повышают до единиц процентов);

- получены уравнения множественных регрессий, связывающие определяемые микрофизические параметры популяций эритроцитов в форме двояковогнутого дискоида с измеряемыми оптическими характеристиками, являющиеся основой предлагаемого метода, позволяющего оперативно, без использования ряда дорогостоящих подготовительных процедур с высокой точностью проводить измерения как микрофизических параметров популяций нативных эритроцитов, так и параметров формы (одновременно объема и площади поверхности).

Впервые реализовано и выложено в открытое пользование приложение для расчета светорассеяния с помощью метода дискретных диполей для

диполей в виде прямоугольного параллелепипеда в программном комплексе с открытым исходным кодом ADDA.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование модели эритроцита в виде двояковогнутого дискоида позволяет на основе светорассеяния с погрешностью $\sim 1\%$ определять средний объем популяции нативных эритроцитов, в то время как модель сфероида обеспечивает погрешность $\sim 10\%$, а модель сферы $\sim 20\%$.

2. Метод определения микрофизических параметров популяции эритроцитов (концентрация, параметры функции распределения по размерам, показатель преломления) на основе использования установленных устойчивых регрессионных соотношений между определяемыми параметрами и измеряемыми угловыми коэффициентами рассеяния, поляризационными характеристиками рассеянного излучения, позволяющий определять данные микрофизические параметры при разбросе их в широких пределах без использования априорной информации с погрешностями порядка единиц процентов.

3. Метод определения параметров формы популяций нативных эритроцитов на основе установленных устойчивых регрессионных соотношений между определяемыми параметрами и коэффициентами рассеяния $\beta(\theta)$ в диапазоне углов $12^\circ \div 50^\circ$, позволяющий оперативно с погрешностью порядка единиц процентов одновременно определять их средний объем и среднюю площадь поверхности.

4. Модификация метода дискретных диполей, представленных кубическими диполями, к диполям в виде прямоугольных параллелепипедов позволяющая сократить потребляемую оперативную память и время расчета параметров светорассеяния сплюснутых и вытянутых рассеивателей более чем на два порядка при сохранении точности, соответствующей использованию кубических диполей ($\sim 2\%$).

Личный вклад соискателя

Результаты диссертационной работы, сформулированные в защищаемых положениях и выводах, получены автором самостоятельно. Научный руководитель М.М. Кугейко принимал участие в выборе темы, постановке задач и обсуждении полученных результатов. М.А. Юркин и П.К. Шоме – соавторы публикации [4]. М.А. Юркин является автором ADDA для МДД с точечными и кубическими диполями, курировал разработку ADDA для прямоугольных диполей, детально изучал спектр (собственных значений) матрицы междипольного взаимодействия и сходимость, тестировал итоговый

код программы, а также принимал участие в обсуждении результатов. П.К. Шоме является автором программы оптимизированного численного интегрирования тензора Грина, которая представляет собой часть метода дискретных диполей для пространственного интегрирования тензора Грина.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Изложенные в диссертационной работе результаты докладывались на следующих конференциях: IX Международной научной конференции «Лазерная физика и оптические технологии» (Гродно, 2012); Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (Минск, 2013, 2014, 2015); Международной конференции «Лазеры, измерения, информация» (Санкт-Петербург, 2014); Международной научно-практической конференции «Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» (Минск, 2014); XV International Conference on Electromagnetic and Light Scattering (Leipzig, Germany, 2015); Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 2015); X Белорусско-Российском семинаре «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (Минск, 2015); XXIII Международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте» (Новороссийск, 2015).

Результаты работы применялись для расчета светорассеяния графеновых пластин, что позволило существенно (на 2 порядка) увеличить скорость расчета и во столько же раз уменьшить потребляемую память, программа расчета доступна по https://github.com/adda-team/adda/tree/rectangular_dipole [24].

Получен 1 патент Республики Беларусь.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 22 научных работах, из которых 7 – статьи в научных журналах в соответствии с п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 5,3 авторского листа), 1 – статья в журнале «Электроника-инфо», 11 – статьи в сборниках трудов конференций, 3 – тезисы докладов на конференциях. По результатам диссертации получен 1 патент Республики Беларусь. Разработан и представлен для свободного использования программный продукт с открытым исходным кодом, реализующий МДД для прямоугольных диполей.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений и

сокращений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 122 страницы, из которых 8 страниц занимают 19 рисунков, на 9 страницах приведено 26 таблиц, 5 страниц занимают два приложения. Библиографический список состоит из 153 наименований (на 14 страницах), включая собственные публикации соискателя.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит литературный обзор, в котором представлены основные публикации по теме определения микрофизических параметров дисперсных сред и, в частности, эритроцитов крови человека. Завершением обзора является обоснование актуальности проводимой работы и обозначение задач, требующих рассмотрения.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию метода дискретных диполей (МДД) с применением объемных диполей в форме прямоугольного параллелепипеда и диполей как точек на прямоугольной сетке.

Исследованы особенности дискретизации интегрального уравнения Максвелла. Показано, что использование прямоугольных диполей в методе дискретных диполей корректно только в случае согласованного применения способов расчета тензорной функции Грина и поляризуемости диполя. Согласованное применение предполагает вычисление поляризуемости и расчет функции Грина для точечных диполей или вычисление поляризуемости диполя как для объемного элемента и интегрирование тензорной функции Грина по объему для остальных диполей (или хотя бы для нескольких соседних дипольных слоев).

Смоделировано светорассеяние графеновой пластинки с использованием длины волны $\lambda = 3$ мкм. Это прямоугольная пластина размером $9 \times 9 \times 0,02$ мкм и показателем преломления $m = 3 + 1,4i$. Так, среднеквадратичная относительная погрешность составила 0,2%, 0,8% и 2,0% для диполей $10 \times 10 \times 10$ нм, $50 \times 50 \times 10$ нм и $100 \times 100 \times 10$ нм соответственно. Ускорение для прямоугольных диполей составляет 42 и 200 соответственно. Уменьшение количества диполей не только ускоряет расчеты, но также пропорционально уменьшает требования к потребляемой памяти.

Показано превосходство прямоугольных диполей для расчета светорассеяния нативных эритроцитов (представленных в виде двояковогнутого диска) при высокой дискретизации: в два раза лучше точность для одинаковых вычислительных мощностей, а время расчета сокращается на 10%.

Проведено сравнение теоретически рассчитанной (с применением

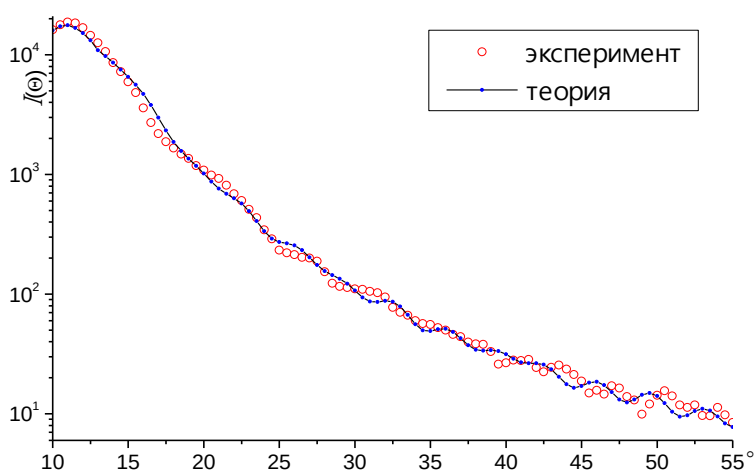


Рисунок 1. – Теоретическая и экспериментальная индикатриса рассеяния

диполей в виде прямоугольного параллелепипеда) и экспериментальной (полученной на сканирующем проточном цитометре) индикатрисы рассеяния эритроцита в виде двояковогнутого дискоида с параметрами $D=8,59$ мкм, $h=2,20$ мкм, $b=1,08$ мкм, $c=5,72$ мкм, $m=1,053+8 \times 10^{-5}$.

Показано, что экспериментальные и теоретические данные согласуются друг с другом, среднеквадратичная относительная погрешность составляет менее 15%. Данные представлены на рисунке 1.

Третья глава посвящена моделированию оптических характеристик популяций эритроцитов при использовании различных моделей единичного эритроцита и выбору оптимальных оптических характеристик (коэффициентов рассеяния, поляризации, деполяризации) для обеспечения минимальной погрешности определения в методах определения микрофизических параметров (МФП). Использовалась модель шара, сфероида и двояковогнутого дискоида. Модель двояковогнутого дискоида наилучшим образом аппроксимирует нативный эритроцит, уравнение его поверхности:

$$\rho^4 + 2S\rho^2 z^2 + z^4 + P\rho^2 + Qz^2 + R = 0, \quad (1)$$

где ρ – радиус в цилиндрической системе координат ($\rho^2 = x^2 + y^2$). Параметры P , Q , R и S связаны с геометрическими параметрами эритроцита следующим образом: $P = -\frac{D^2}{4} - \frac{b^2 h^2}{4D^2} + \frac{b^2 c^4}{4D^2(h^2 - b^2)}$, $Q = \frac{D^4 + 4D^2 P - b^4}{4b^2}$, $R = -\frac{D^2}{16}(D^2 + 4P)$, $S = -\frac{c^2 + 2P}{h^2}$.

Геометрический смысл параметров b , c , D и h показан на рисунке 2.

Рассчитывались элементы матрицы рассеяния, коэффициенты направленного рассеяния и поляризационные характеристики для популяции эритроцитов с использованием различных моделей эритроцита. Для модели сферы использовалась теория Ми, для сфероида и двояковогнутого дискоида использовался метод дискретных диполей.

Связи между определяемыми МФП

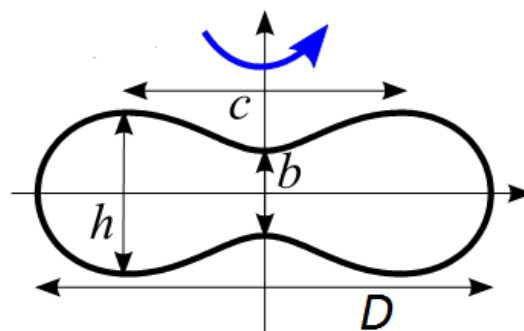


Рисунок 2. – Геометрический смысл параметров в (1)

эритроцитов x_i и измеряемыми оптическими характеристиками эритроцитов y_{ij} устанавливались с использованием метода линейных регрессий:

$$\ln(x_i) = a_0 + \sum_{j=1}^n a_{ij} \ln(y_{ij}). \quad (2)$$

Численные значения коэффициентов a_j определяются на основе используемой выборки методом наименьших квадратов:

$$\min \left(\sum_{i=1}^N \left[\ln(x_i) - a_{i0} - \sum_{j=1}^n a_{ij} \ln(y_{ij}) \right] \right)^2. \quad (3)$$

Для выбора набора оптимальных измеряемых параметров (угловых $\beta(\Theta)$ и поляризационных характеристик $P(\Theta)$) применяется метод минимизации погрешности:

$$\min \delta x_i(\Theta_{1l} \dots \Theta_{nl}) = \min \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \left[\frac{1}{x_{ik}} \left| x_{ik} - \exp(a_{i0}(\Theta_{1l} \dots \Theta_{nl}) - \sum_{j=1}^n a_{ij}(\Theta_{1l} \dots \Theta_{nl}) \ln(y_{jkl}^*)) \right| \right], \quad (4)$$

где M – размер выборки, l – индекс текущего набора угловых и поляризационных характеристик, δx_i – относительная погрешность измерения i -того микрофизического параметра, $y_{jkl} = y_j(\Theta_{kl})$ – измеряемая под углом Θ_{kl} оптическая характеристика, $a_{ij}(\Theta_{1l} \dots \Theta_{nl})$ – коэффициенты, определяемые в (3) для l -того набора углов, $y_{jkl}^* = y_j(\Theta_{kl}) \pm \delta y$, где δy – случайная погрешность, не превышающая 5%.

Оценено влияние количества измеряемых оптических параметров на точностные характеристики определяемых МФП эритроцитов в методах с использованием регрессионных соотношений на примере зависимости минимальной погрешности определения объема от количества измеряемых параметров.

Исследовано влияние модели эритроцитов на точность определяемых МФП на примере определения среднего объема популяций эритроцитов. При переходе от двояковогнутого дискоида к сплюснутому сфероиду с сохранением объема основные микрофизические параметры популяции изменяются незначительно. В то же время, для того чтобы применить модель шара для моделирования светорассеяния, популяцию эритроцитов в виде двояковогнутых дискоидов требовалось заменить на популяцию шаров, пытаясь сохранить при этом максимальное количество наиболее важных микрофизических характеристик, то есть найти такую функцию распределения сфер по размерам, которая обеспечит равенство микрофизических характеристик исходной популяции двояковогнутых дискоидов и аппроксимирующей популяции шаров. С учетом сказанного выше показано, что устанавливаемые регрессионные соотношения между определяемыми и

измеряемыми параметрами чувствительны к выбору математической модели. Так, при сохранении важнейших микрофизических параметров популяций для разных моделей регрессионные соотношения обеспечивают расчетную погрешность определения среднего объема $\sim 1\%$ при использовании модели двояковогнутого дискоида, при использовании модели сплюснутого сфероида и сферы $\sim 8\%$ и $\sim 21\%$ соответственно.

Четвертая глава описывает методы определения МФП нативных и сферизованных эритроцитов. Получены устойчивые регрессионные соотношения, которые связывают определяемые микрофизические параметры, параметры формы популяций эритроцитов в форме сферы (сферизованные эритроциты) и двояковогнутого дискоида (нативные эритроциты) с измеряемыми оптическими параметрами. Для каждого из определяемых МФП установлены коэффициенты направленного рассеяния $\beta(\Theta)$ и коэффициент поляризации $P(\Theta)$, обеспечивающие минимальную погрешность (порядка единиц процентов), рассчитаны коэффициенты в регрессионных соотношениях, что является основой методов измерения комплекса МФП популяций эритроцитов.

Наименьшие погрешности при определении МФП нативных эритроцитов – параметров функции распределения (D_0 и ΔD), концентрации N и показателя преломления n для поляризованного падающего излучения – достигаются при использовании регрессионного соотношения, включающего измерение четырех коэффициентов направленного рассеяния:

$$\ln(x_i) = a_0 + a_1 \ln(\beta(\Theta_1)) + a_2 \ln(\beta(\Theta_2)) + a_3 \ln(\beta(\Theta_3)) + a_4 \ln(\beta(\Theta_4)). \quad (5)$$

Требуемые для измерения углы Θ_i и коэффициенты a_i , соответствующие данным углам, представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Углы, используемые в (5)

Параметр	Θ_1°	Θ_2°	Θ_3°	Θ_4°
D_0	12	17	39	44
ΔD	12	17	30	44
n	10	15	29	36
N	10	16	91	144

Таблица 2. – Коэффициенты регрессионного соотношения (5) и погрешности определяемых МФП

Параметр	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\delta, \%$
D_0	3,4716	-0,1505	-0,6132	0,5359	0,1552	3,19
ΔD	-0,6094	-0,6386	3,2796	-3,3675	0,8191	8,11
n	11,0261	-0,1333	-0,3334	0,6203	0,1430	2,31
N	22,1994	0,6729	0,5626	-0,6326	0,3872	2,87

Наименьшие погрешности при определении МФП для неполяризованного падающего излучения дает регрессионное соотношение, включающее измерение четырех компонентов рассеяния – двух коэффициентов углового рассеяния $\beta(\Theta)$ и двух компонентов коэффициента поляризации $P(\Theta)$, представленное ниже в следующем виде (Θ_i и a_i приведены в таблицах 3 и 4):

$$\ln(x_i) = a_0 + a_1 \ln \beta(\Theta_1) + a_2 \ln \beta(\Theta_2) + a_3 \ln P(\Theta_3) + a_4 \ln P(\Theta_4). \quad (6)$$

Необходимо отметить, что для N использовались только коэффициенты направленного рассеяния $\beta(\Theta)$, то есть использовалось уравнение (5).

Таблица 3. – Углы, используемые в (6)

Параметр	Θ_1°	Θ_2°	Θ_3°	Θ_4°
D_0	13	20	65	79
ΔD	13	20	65	74
n	10	15	66	88
N^*	7	17	107	147

*использовалось (5)

Таблица 4. – Коэффициенты регрессионного соотношения (6) и погрешности определяемых МФП

Параметр	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\delta, \%$
D_0	2,4283	-0,3385	0,3148	0,9258	-1,0309	1,87
ΔD	-1,0572	1,7451	-1,7491	2,0700	-2,6672	7,00
n	2,4364	0,0679	-0,0551	-1,2267	0,0198	1,91
N^*	10,1709	0,6576	0,8710	-0,8862	-0,3426	2,49

*использовалось (5)

Как можно увидеть из таблиц 2 и 4, использование поляризационных измерений приводит лишь к незначительному повышению точности ($\sim$ единиц процентов) и в то же время измерительная схема значительно усложняется за счет привнесения элементов, соответствующих измерению поляризационных компонент. Таким образом, предпочтительнее использовать поляризованное падающее излучение и коэффициенты направленного рассеяния в качестве основных информационных оптических характеристик.

Наименьшие погрешности при определении параметров формы (среднего объема $\langle V \rangle$ и средней площади поверхности $\langle S \rangle$) для поляризованного падающего излучения достигаются при использовании регрессионного соотношения (5). Требуемые для измерения углы Θ_i и коэффициенты a_i , соответствующие данным углам, представлены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5. – Углы, используемые в (5) для определения параметров формы

Параметр	Θ_1°	Θ_2°	Θ_3°	Θ_4°
$\langle V \rangle$	12	17	29	50
$\langle S \rangle$	12	17	44	50

Таблица 6. – Коэффициенты регрессионного соотношения (5) и погрешности параметров формы

Параметр	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\delta, \%$
$\langle V \rangle$	5,0177	-0,3536	-0,6389	1,1774	-0,2669	2,97
$\langle S \rangle$	6,5217	-0,3045	-0,5108	0,712	0,0082	1,81

Сравнивая экспериментальные данные, опубликованные в открытой печати (эксперименты Хайруллиной А.Я.), и результат, полученный с использованием регрессионных соотношений (погрешность составляет $\sim 1\%$), можно говорить о практически полном совпадении результатов. Однако регрессии являются более устойчивыми к ошибкам измерений. Например, при наложении на измеряемые значения случайной ошибки в единицы процентов, погрешности метода, используемого в эксперименте, имеют погрешность определяемого параметра $\sim 5\%$, в то время как погрешности метода, основанного на регрессии, остаются на уровне $\sim 1\%$.

Предложена блок-схема экспериментальной установки, реализующая предлагаемый метод, устойчивая к изменениям аппаратных констант приемников, источников излучения, измерительных блоков, загрязнений оптических элементов, в том числе и измерительной кюветы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведен теоретический анализ различных возможностей использования диполей в виде прямоугольного параллелепипеда в МДД, включая спектр собственных значений тензорной функции Грина, и обоснованы условия применения формулировок поляризуемости, полученных в предположении точечных диполей и интегрирования тензора Грина. Показано, что оба подхода имеют право на существование, однако выражения для поляризуемости и междипольного взаимодействия должны соответствовать друг другу. Согласованное применение предполагает использование поляризуемости в формулировке для точечных диполей и расчет функции Грина для точечного приближения или вычисление поляризуемости диполя как для объемного элемента и интегрирование тензорной функции Грина для остальных диполей (или хотя бы для нескольких соседних дипольных слоев). При согласованном использовании достигается ускорение расчетов для сильно сплюснутых частиц более чем на 2 порядка. Произведено сравнение теоретически рассчитанной (с применением диполей в виде прямоугольного параллелепипеда) и экспериментальной (полученной на сканирующем проточном цитометре) индикатрисы рассеяния эритроцита в виде двояковогнутого дискоида с параметрами $D=8,59$ мкм, $h=2,20$ мкм, $b=1,08$ мкм, $c=5,72$ мкм, $m=1,053+8 \times 10^{-5}$. Показано, что экспериментальные и теоретические данные хорошо согласуются друг с другом, среднеквадратичная относительная

погрешность составляет менее 15% [4, 12, 22, 24].

2. Модифицированный МДД с использованием диполей в виде прямоугольного параллелепипеда реализован в программном комплексе с открытым исходным кодом ADDA (тем самым созданы условия для использования заинтересованными исследователями). Правильность расчетов была проверена набором типовых задач: все формулировки сходятся с увеличением дискретизации [4, 22, 24].

3. Показано превосходство использования диполей в виде прямоугольного параллелепипеда для расчета светорассеяния сплюснутых и вытянутых частиц. Для нативных эритроцитов (представленных в виде двояковогнутого дискоида) при высокой дискретизации – в два раза лучше точность для одинаковых вычислительных мощностей, для графеновой пластинки размером $9\text{ мкм} \times 9\text{ мкм} \times 20\text{ нм}$ сокращение времени расчета и потребляемой оперативной памяти составило более 10^2 раз [4, 22].

4. Оценено влияние количества измеряемых оптических параметров на точностные характеристики определяемых МФХ эритроцитов в методах с использованием регрессионных соотношений на примере зависимости минимальной погрешности определения объема от количества измеряемых параметров [5].

5. Исследовано влияние поляризованного и неполяризованного оптического излучения на точностные характеристики определяемых МФП эритроцитов, представленных в виде сферы, сплюснутого дискоида, двояковогнутого дискоида, в методах с использованием установления регрессионных соотношений между определяемыми и измеряемыми параметрами. Показано:

- при применении модели сферы для сферизованных эритроцитов средние по выборке погрешности для неполяризованного излучения при измерениях коэффициентов поляризации рассеянного под углом излучения $P(\Theta)$ составляют единицы процентов. Для поляризованного оптического излучения погрешности в единицы процентов соответствуют измерению угловых рассеивающих параметров $\beta(\Theta)$ [1, 2, 20, 23];

- для нативных эритроцитов погрешности в единицы процентов достигаются в методах с использованием регрессионных соотношений как при измерении коэффициентов направленного рассеяния (поляризованное падающее излучение), так и при совместном измерении с коэффициентами линейной поляризации (неполяризованное падающее излучение). С использованием регрессионных соотношений между определяемыми МФП и измеряемыми ОХ как для поляризованного излучения, так и неполяризованного можно с точностью в $\sim 2\%$ одновременно определять такие важные

диагностические параметры, как средний объем и средняя площадь поверхности популяций эритроцитов [5, 6, 17-20].

6. Исследовано влияние модели эритроцитов на точность определяемых МФП на примере определения среднего объема популяций эритроцитов. Показано, что устанавливаемые регрессионные соотношения между определяемыми и измеряемыми параметрами чувствительны к выбору математической модели эритроцита. Так, при сохранении важнейших микрофизических параметров популяций эритроцитов для разных моделей регрессионные соотношения обеспечивают расчетную погрешность определения среднего объема порядка 1% при использовании модели двояковогнутого дискоида, при использовании модели сплюснутого сфероида и сферы ~8% и ~21% соответственно [6].

При предварительной сферизации эритроцитов в методах с использованием регрессионных соотношений для модели сферы расчетная погрешность определения МФП также составляет порядка 1%. Однако при сферизации часть частиц не изменяет своей формы (~ 7%), в связи с чем реальная погрешность будет выше расчетной [1, 2, 6, 23].

7. Получены устойчивые регрессионные соотношения, которые связывают определяемые микрофизические параметры популяций сферизованных эритроцитов (с применением модели сферы) с измеряемыми оптическими параметрами (коэффициентами рассеяния под углом $\beta(\Theta)$ и коэффициентами поляризации $P(\Theta)$). Для каждого из определяемых параметров установлены углы, обеспечивающие погрешность определения МФП порядка единиц процентов, рассчитаны коэффициенты в регрессионных соотношениях, что является основой метода измерения комплекса МФП сферизованных эритроцитов с использованием данных соотношений [1, 2, 6, 9, 10, 23].

8. Разработан метод определения микрофизических параметров и формы эритроцитов крови человека, представленных в виде сплюснутого сфероида, основанный на установлении регрессионных соотношений между параметром асферичности e и малоугловыми коэффициентами направленного рассеяния $\beta(\Theta)$ [3, 11, 13-15, 21].

9. Получены устойчивые регрессионные соотношения, которые связывают определяемые микрофизические параметры, параметры формы популяций эритроцитов в форме двояковогнутого дискоида с измеряемыми оптическими параметрами (коэффициентами рассеяния под углом $\beta(\Theta)$ и коэффициентами поляризации $P(\Theta)$) для поляризованного и неполяризованного оптического излучения. Для каждого из определяемых параметров установлены углы, обеспечивающие минимальную погрешность (~ единиц процентов), рассчитаны коэффициенты в регрессионных соотношениях, что является

основой метода измерения комплекса МФП нативных эритроцитов с использованием данных соотношений [5-8, 17-19].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Практическая значимость данной работы заключается в использовании полученных функциональных связей при создании лабораторных диагностических систем, позволяющих осуществлять экспресс-анализ форменных элементов крови – нативных эритроцитов, представленных в форме двояковогнутых дискоидов, наиболее соответствующих реальному эритроциту. Важным преимуществом данных систем будет являться то, что перед анализом не потребуется дополнительное время для сферизации частиц, также исключаются специальные реагенты для сферизации, что, в свою очередь, ведет к уменьшению стоимости проведения анализа, а обработка измерительной информации будет проводиться в реальном времени с получением не используемых ранее диагностических параметров. Данные системы могут быть реализованы в компактном переносном варианте и использоваться вне лаборатории.

Полученные результаты по установлению регрессионных соотношений между определяемыми и измеряемыми параметрами популяций нативных эритроцитов могут быть применены в усовершенствовании используемых на практике гематологических анализаторов, что приведет к более качественному анализу данных элементов крови как за счет повышения точности измерений, так и за счет появления новых диагностических параметров (например, средняя площадь поверхности эритроцита в популяции).

Модифицированный программный продукт с открытым исходным кодом ADDA, реализующий МДД с диполями в виде прямоугольных параллелепипедов, может, кроме отмеченных задач диагностики биообъектов, более эффективно использоваться при решении многих других задач оптики рассеивающих сред: экологических (контроль загрязнений окружающей среды), метеорологических (контроль облачности), технологических (контроль компонентного состава сред); научных – поскольку позволяет рассчитывать оптические характеристики частиц с учетом особенностей формы рассеивателя. Для сильно сплюснутых или вытянутых рассеивателей достигается ускорение расчетов на несколько порядков. При этом уменьшаются требования к потребляемой памяти вычислительных систем, что дает возможность вести расчет с использованием стандартных пользовательских вычислительных мощностей.

Практическую значимость подтверждает также и полученный автором по результатам работы патент Республики Беларусь на изобретение.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1. Кугейко, М.М. Анализ информативности поляризации рассеянного излучения в диагностике микрофизических параметров эритроцитов / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2012. – № 2. – С. 19–23.
2. Кугейко, М.М. Анализ информативности поляризационных и нефелометрических измерений в диагностике микрофизических параметров эритроцитов / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Оптика и спектроскопия. – 2012. – Т. 113, № 4. – С. 490–495.
3. Кугейко, М.М. Метод определения асферичности и микрофизических параметров эритроцитов по коэффициенту направленного рассеяния / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т. 117, № 4. – С. 170–176.
4. Smunev, D.A. Rectangular dipoles in the discrete dipole approximation / D.A. Smunev, P.C. Chaumet, M.A. Yurkin // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2015. – Vol. 156, № 5. – P. 67–79.
5. Кугейко, М.М. Метод определения площади поверхности эритроцитов по поляризационно-нефелометрическим измерениям / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Журнал прикладной спектроскопии. – 2015. – Т. 82, № 6. – С. 909–915.
6. Кугейко, М.М. Влияние модели эритроцитов на точность определения их среднего объема по поляризационно-нефелометрическим измерениям / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 2. – С. 222–229.
7. Кугейко, М.М. Методы определения микрофизических параметров эритроцитов по поляризационно-нефелометрическим измерениям / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Электроника-инфо. – 2016. – № 2. – С. 41–49.
8. Кугейко, М.М. Определение микрофизических параметров нативных эритроцитов по результатам измерений оптических характеристик рассеянного излучения / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2016. – № 2. – С. 73–78.

Статьи в сборниках материалов конференций

9. Кугейко, М.М. Информативность поляризационных и нефелометрических измерений в диагностике микрофизических параметров крови / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Лазерная физика и оптические

технологии: сб. науч. трудов IX Междунар. науч. конф., Гродно, Ч. 2. 30 мая – 2 июня, 2012. / ГрГУ ; редкол.: С.А. Маскевич [и др.]. – Гродно, 2012. – С. 84–87.

10. Кугейко, М.М. Анализ информативности поляризационных и нефелометрических измерений в диагностике микрофизических параметров эритроцитов / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Квантовая электроника : Материалы IX Международной научно-технической конференции, Минск, 18–21 ноября 2013 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: М.М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2013. – С. 264.

11. Кугейко, М.М. Оперативный метод определения параметра асферичности эритроцитов по коэффициенту направленного рассеяния / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Квантовая электроника: Материалы IX Международной научно-технической конференции, Минск, 18–21 ноября 2013 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: М.М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2013. – С. 263.

12. Кугейко, М.М. Расчет оптических параметров форменных элементов крови / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сб. научных статей VIII Междунар. науч.-технич. конф. Медэлектроника–2014, Минск, 10–11 декабря 2014 г. / БГУИР ; редкол.: С.К. Дик [и др.]. – Минск, 2014. – С. 196–197.

13. Кугейко, М.М. Определение асферичности и микрофизических параметров эритроцитов по коэффициенту направленного рассеяния / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сб. научных статей VIII Междунар. науч.-технич. конф. Медэлектроника–2014, Минск, 10–11 декабря 2014 г. / БГУИР ; редкол.: С.К. Дик [и др.]. – Минск, 2014. – С. 329–333.

14. Кугейко, М.М. Определение размеров и параметров формы эритроцитов крови человека / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : Материалы третьей Междунар. научно-практической конференции, Минск, 28–29 апреля 2015 г. / НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ ; редкол.: гл. ред. В.И. Попечиц, Ю.И. Дудчик, Н.И. Шугалей. – Минск, 2015. – С. 103–105.

15. Кугейко, М.М. Нефелометрический метод определения микрофизических параметров эритроцитов крови / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: сб. статей 10-го Белорусско-Российского семинара, Минск, 26–29 мая 2015 г. / НАН Беларуси, Институт физики им. Б.И. Степанова ; редкол.: И.В. Дулевич, Г.П. Яблонский. – Минск, 2015. – С. 188–191.

16. Кугейко, М.М. Метод определения площади поверхности и объема эритроцитов по нефелометрическим измерениям / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв

// Труды XXIII Международной конференции Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте–2015, Новороссийск, 7–11 сентября 2015 г. / ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова ; под. ред. В. Е. Привалова. – Новороссийск, 2015. – С. 73 – 74.

17. Кугейко, М.М. Информативность поляризационных и нефелометрических измерений в определении микрофизических параметров для различных моделей эритроцитов / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Квантовая электроника : Материалы X Международной научно-технической конференции, Минск, 9–13 ноября 2015 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: М.М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2015. – С. 257–261.

18. Кугейко, М.М. Метод определения площади поверхности эритроцитов по поляризационно-нефелометрическим измерениям / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Квантовая электроника: Материалы X Международной научно-технической конференции, Минск, 9–13 ноября 2015 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: М.М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2015. – С. 252–254.

19. Кугейко, М.М. Определение площади поверхности и объема эритроцитов по нефелометрическим измерениям / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Квантовая электроника: Материалы X Международной научно-технической конференции, Минск, 9–13 ноября 2015 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: М.М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2015. – С. 255–256.

Тезисы докладов на конференциях

20. Кугейко, М.М. Анализ информативности поляризационных и нефелометрических измерений в диагностике микрофизических параметров эритроцитов / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Межд. конф. «ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ – 2014», Санкт-Петербург, 9–11 июня 2014 г. – СПб., 2014. – С. 11.

21. Кугейко, М.М. Оперативный метод определения параметра асферичности эритроцитов по коэффициенту направленного рассеяния / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв // Межд. конф. «ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ – 2014», Санкт-Петербург, 9–11 июня 2014 г. – СПб., 2014. – С. 12.

22. Smunev, D.A. Extension of the discrete dipole approximation to rectangular cuboid dipoles / D.A. Smunev, P.C. Chaumet, M.A. Yurkin // XV International Conference on Electromagnetic and Light Scattering, Leipzig, 21–26 June 2015 / Leibniz Institute for Tropospheric Research. – Leipzig, 2015. – P. 148.

Патенты

23. Способ определения показателя преломления эритроцитов в крови человека: пат. №19144 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) А 61В 5/145; (2006.01) G 01N 21/41 / М.М. Кугейко, Д.А. Смунёв; заявитель Белорус. гос. ун-т. – № а 20120301; заявл. 01.03.2012; опубл. 03.02.15 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 2. – С. 42.

Научные программные продукты

24. ADDA Rectangular dipole [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access: https://github.com/adda-team/adda/tree/rectangular_dipole.

РЭЗІЮМЭ

Смунёў Дзмітрый Аляксандравіч

**ВЫЗНАЧЭННЕ МІКРАФІЗІЧНЫХ ПАРАМЕТРАЎ ПАПУЛЯЦЫЙ
ЭРЫТРАЦЫТАЎ НА АСНОВЕ ПАЛЯРЫЗАЦЫЙНЫХ І
НЕФЕЛАМЕТРЫЧНЫХ ВЫМЯРЭННЯЎ**

Ключавыя словы: метада дыскрэтных дыполяў, прамавугольныя паралелепіпеды, светарассейванне, аптычныя і мікрафізічныя ўласцівасці папуляцый эрытрацытаў, рэгрэсійныя суадносіны, метады вызначэння мікрафізічных параметраў эрытрацытаў.

Мэта працы: даследаванне светарассейваючых уласцівасцей папуляцый эрытрацытаў, усталяванне рэгрэсійных суадносін паміж вымеранымі аптычнымі характарыстыкамі і вызначаемымі мікрафізічнымі параметрамі для выкарыстання пры распрацоўцы высокадакладных экспрэс-метадаў вымярэння вызначаемых параметраў.

Метады даследавання: тэорыя Мі, метада дыскрэтных дыполяў, рэгрэсійныя суадносіны, статыстычнае мадэляванне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Устаноўлена, што пры выкарыстанні аб'ёмных дыполяў у форме прамавугольнага паралелепіпеда і кропкавых дыполяў на прамавугольнай сетцы ў методыцы дыскрэтных дыполяў неабходна сагласаванне палярызуемасці і дыпольнага узаемадзеяння. Атрыманы ўстойлівыя рэгрэсійныя суадносіны, якія звязваюць вызначаемыя мікрафізічныя параметры папуляцый эрытрацытаў з вымеранымі аптычнымі характарыстыкамі, і метады на іх аснове. Прапанаваны метада адначасовага вызначэння сярэдняй плошчы паверхні і сярэдняга аб'ёма папуляцый натыўных эрытрацытаў у форме дваякавагнутых дыскоідаў. Ацэнена ўздзеянне мадэлі эрытрацыта на дакладнасныя характарыстыкі мікрафізічных параметраў эрытрацытаў. Паказана, што выкарыстанне палярызацыйных вымярэнняў не прыводзіць да значнага павелічэння дакладнасці (толькі на адзінкі працэнтаў).

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення. Атрыманыя вынікі могуць выкарыстоўвацца пры стварэнні лабараторных сістэм аналізу крыві, якія дазваляюць праводзіць яе экспрэс-аналіз з новымі дыягнастычнымі параметрамі, ва ўдасканаленні выкарыстоўваемых на практыцы гематалагічных аналізатараў. Метада дыскрэтных дыполяў з прамавугольнымі дыполямі можа быць выкарыстаны для паскарэння разліку светарасейвання моцна сціснутых ці выцянутых расейвацеляў, у дыягностыцы аэразольных забруджванняў асяроддзя, у кантролі тэхналагічных працэсаў з удзелам аэрадысперсных асяроддзяў.

РЕЗЮМЕ

Смунёв Дмитрий Александрович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОПУЛЯЦИЙ ЭРИТРОЦИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ И НЕФЕЛОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Ключевые слова: метод дискретных диполей, прямоугольные параллелепипеды, светорассеяние, оптические и микрофизические характеристики, популяции эритроцитов, регрессионные соотношения, методы определения микрофизических параметров.

Цель работы: исследование светорассеивающих свойств популяций эритроцитов, установление регрессионных соотношений между измеряемыми оптическими характеристиками и определяемыми микрофизическими параметрами для использования в разработке высокоточных экспресс-методов измерения определяемых параметров.

Методы исследования: теория Ми, метод дискретных диполей, регрессионные соотношения, статистическое моделирование.

Полученные результаты и их новизна: Установлено, что при использовании объемных диполей в форме прямоугольного параллелепипеда и точечных диполей на прямоугольной сетке в методе дискретных диполей необходимо согласование поляризуемости и дипольного взаимодействия. Получены устойчивые регрессионные соотношения, которые связывают определяемые микрофизические параметры популяций эритроцитов с измеряемыми оптическими характеристиками, и методы на их основе. Предложен метод одновременного определения средней площади поверхности и среднего объема популяций нативных эритроцитов в виде двояковогнутых дискоидов. Оценено влияние модели эритроцитов на точностные характеристики микрофизических параметров эритроцитов. Показано, что использование поляризационных измерений не приводит к существенному увеличению точности (только на единицы процентов).

Область применения и рекомендации по использованию: Полученные результаты могут использоваться при создании лабораторных систем анализа крови, позволяющих осуществлять ее экспресс-анализ с новыми диагностическими параметрами, в усовершенствовании используемых на практике гематологических анализаторов. Метод дискретных диполей с прямоугольными диполями может быть применен для ускорения расчета светорассеяния сильно сплюснутых или вытянутых рассеивателей, в диагностике аэрозольных загрязнений среды, в контроле технологических процессов с участием аэродисперсных сред.

SUMMARY

Dmitry Smunev

DETERMINING MICROPHYSICAL PARAMETERS OF RED BLOOD CELL POPULATIONS BY USING OF POLARIZATION AND NEPHELOMETRIC MEASUREMENTS

Key words: discrete dipole approximation, rectangular dipoles, light scattering, optical properties and microphysical parameters of red blood cell populations, regression correlations, methods for determining the microphysical parameters of red blood cells.

Work objective: research of light-scattering properties of the red blood cell populations, determination of regression correlations between measured optical properties and retrieved microphysical parameters for use in the development of high-precision measurements of retrieved parameters.

Research approaches: Mie theory, discrete dipole approximation, regression correlations, statistical modelling.

Obtained results and their novelty: It is determined that by using volume dipoles in the cuboid form and point dipoles on a rectangular grid in the discrete dipole approximation the coordination of polarizability and interaction term calculations is necessary. Stable regression correlations that bind retrieved microphysical parameters of red blood cell populations with measured optical properties and relative methods are obtained. For the first time the method for the simultaneous determination the average surface area and average volume of populations of native red blood cells in form of biconcave discoids is proposed. It is shown that the using of polarization measurements doesn't lead to the significant accuracy increase (just by several orders).

Recommendations for practical use and application areas: The obtained results can be used by the implementation of laboratory systems of blood analysis that enable its rapid analysis with new diagnostic parameters, by improvement of practically used hematology analyzers. Discrete dipole approximation with rectangular dipoles can be used for the acceleration of light scattering calculation of strongly oblate or prolate scatterers, in diagnostics of medium airborne pollution, in process monitoring with the involvement of aerodispersion mediums.