

Показатель капиллярного давления периодонта у лиц контрольной группы с интактным периодонтом составил  $20,3 \pm 0,43$  мм рт. ст. При включенных дефектах зубных рядов в сочетании с зубочелюстными аномалиями нефункционирующей группы зубов значения капиллярное давление периодонта варьировали в пределах  $19,11 \pm 0,11$  —  $14,5 \pm 0,38$  мм рт. ст., в среднем —  $16,8 \pm 0,4$  мм рт. ст., и было снижено в 1,2 раза по сравнению со здоровыми тканями периодонта ( $p < 0,001$ ). Среднее значение капиллярного давления периодонта у пациентов с включенными дефектами зубных рядов функционирующей группы зубов было  $29 \pm 0,9$  мм рт. ст., что в 1,43 раза ( $p < 0,001$ ) больше по сравнению со здоровыми тканями периодонта.

**Заключение.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что впервые разработано и апробировано устройство для определения капиллярного давления периодонта у пациентов с дефектами зубных рядов в сочетании с зубочелюстными аномалиями. Доказано, что при включенных дефектах зубных рядов в сочетании с зубочелюстными аномалиями характерно снижение капиллярного давления периодонта нефункционирующей группы зубов и его повышение в 1,43 раза в функционирующей группе.

Таким образом, разработанное устройство и методика определения капиллярного давления периодонта рекомендованы к использованию при обследовании и лечении пациентов с дефектами зубных рядов в сочетании с зубочелюстными аномалиями. Высокая чувствительность (97 %), минимальное время (2 мин) на проведение диагностической процедуры позволяют отнести разработанную диагностику к разряду инновационных экспресс-методов.

#### *Литература*

1. Кулаженко В.И. Пародонтоз и его лечение с применением вакуума. Одесса. 1960. С. 46 – 47.
2. Устройство для определения капиллярного давления в тканях периодонта. Денисова Ю.Л./ Патент РБ на изобретение №15437/ МПК А 61 В5/02 // опубл. 28.02.2012.
3. Денисова, Ю.Л. Новый метод исследования капиллярного давления в тканях периодонта у пациентов с зубочелюстными аномалиями и деформациями / Ю.Л. Денисова // Мед. журн. – 2012. – № 2. – С. 49–52.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ АСФЕРИЧНОСТИ И МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭРИТРОЦИТОВ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ НАПРАВЛЕННОГО РАССЕЯНИЯ**

*Д.А. Смунев, М.М. Кугейко*

*Белорусский государственный университет*

*пр. Независимости, 6, БГУ, каф. КРиОЭ, 220030, Минск, Беларусь, тел. +375 17 2121016*

*E-mail: kugeiko@bsu.by*

Abstract. We propose a method for determining microphysical parameters and shape of erythrocytes in human blood, based on the finding of regression relations between these parameters and the small-angle directional scattering coefficients  $\beta(\Theta)$ . It is shown that by using  $\beta(\Theta)$  for angles  $\Theta = 5^\circ$  and  $12^\circ$  in the blood transparency window one can determine both microphysical parameters, the erythrocytes refractive index, and form parameters such as asphericity, the size of the major axis of the spheroid with an accuracy of the order of several percents.

Неослабевающий интерес исследователей к эритроцитам крови объясняется их высокой чувствительностью к патологическим изменениям в организме человека. Существенные нарушения, связанные с изменением характеристик эритроцитов, наблюдаются при истинной полицитемии, множественной миеломе, острых и хронических лейкозах,

анемиях. Высокой эффективности для определения МФП эритроцитов (счетная  $N$  и объемная  $C_V$  концентрации; параметры функции распределения по размерам – радиус  $r$  и полуширина  $\Delta r$ ; действительная часть показателя преломления  $n$ ) можно достичь с использованием оптических методов исследования. Важным преимуществом таких методов является бесконтактный способ контроля. Размер и форма эритроцитов также имеют важное диагностическое значение. Так, преобладание в крови эритроцитов малых размеров (микроцитоз) наблюдается при гемолитической болезни, анемии, после хронической кровопотери и нередко при злокачественных заболеваниях. Увеличение эритроцитов (макроцитоз) встречается при многих заболеваниях печени, алкоголизме, злокачественных новообразованиях, понижении функции щитовидной железы, миелопролиферативных заболеваниях, после спленэктомии и т.д.

Существует два подхода к исследованию состава дисперсной среды, а именно: методы, базирующиеся на измерениях отклика дисперсной системы как целого и методы, которые изучают отдельные элементы дисперсной среды. Оба подхода имеют свои преимущества и недостатки. Так достаточно легко построить эксперимент по измерению рассеяния света на ансамбле частиц, однако, извлечение полезной информации о дисперсности системы представляется довольно сложной задачей. С другой стороны, экспериментально достаточно сложно изучать отдельные элементы дисперсности, но определить параметры элемента по оптическим измерениям гораздо легче, чем в первом случае.

Такая дисперсная среда как цельная кровь по своим оптическим свойствам близка к суспензии эритроцитов, поэтому исследования часто проводят на омытых эритроцитах, суспензированных в буферном растворе с объемной концентрацией, соответствующей реальной крови. В большинстве случаев, относящихся к исследованию дисперсной среды как целого, задача определения МФП эритроцитов сводится к обращению интегрального уравнения

$$\tau(2\pi r/\lambda) = \int_0^{\infty} F(2\pi r/\lambda, n) f(r) dr,$$

где  $\tau(2\pi r/\lambda)$  – экспериментально определяемая функция (элементы матрицы рассеяния),  $f(r)$  – функция распределения частиц по размерам,  $F(2\pi r/\lambda, n)$  – ядро уравнений известное из теории рассеяния света на отдельной частице. Обращение этого интегрального уравнения путем замены его алгебраической системой уравнений приводит к неустойчивости решения, свойственной интегральным уравнениям первого рода. Наложение дополнительных условий приводит к регуляризации задачи, но задача при этом может оказаться некорректной, а ее решение – неоднозначным. При неизвестном же комплексном показателе преломления вещества частицы в общем случае становится невозможным определить функцию распределения частиц по размерам.

Для анализа одиночных частиц требуется предварительная сферизация эритроцитов, что вызвано сильным различием индикатрис рассеяния одиночных сферических частиц и сплюснутого дискоита (эритроцит). К группе, изучающей отдельные элементы дисперсной среды, можно отнести метод «пролетной индикатрисы», обладающий достаточно высокой точностью определения показателя преломления  $n-1$  и размера  $r$  одиночных сферических частиц (~ 5 %), требующий предварительной сферизации эритроцитов. К недостаткам следует отнести необходимость построения калибровочных кривых для измеряемых параметров индикатрисы при различных значениях  $r$  и  $n$  и потребность выделения проб эритроцитов, что приводит к отсутствию оперативности. К сказанному следует также добавить, что проточные цитометры представляют собой либо дорогостоящую импортную аппаратуру, либо специальное уникальное экспериментальное оборудование, что создает дополнительные экономические и технические проблемы при их внедрении. К дорогостоя-

ящим и сложным в обслуживании являются и лазерные голографические цифровые микроскопы, позволяющие определять форму эритроцита. Для характеристики форм здесь введен коэффициент сферичности  $k=h/H$ , где  $h$  – толщина клетки в центральной части,  $H$  – средняя высота на расстоянии  $r=d/4$  от центра, где  $d$  – диаметр клетки. Для двояковыпуклых эритроцитов  $k<1$ , для дискоида  $k=1$ , для выпуклых клеток  $k>1$ , для сферы и сфероида  $k=2/\sqrt{3}=1,155$ .

В работах авторов рассмотрены принципы корреляционной спектрофелометрии, заключающиеся в определении фракционных концентраций атмосферного аэрозоля с использованием уравнений множественной регрессии по значениям оптических характеристик (ОХ) под несколькими углами приема или на нескольких длинах волн. Получены регрессионные соотношения между микрофизическими параметрами (МФП) эритроцитов крови человека и угловыми коэффициентами линейной поляризации  $P(\Theta)$ , между МФП эритроцитов и угловыми коэффициентами линейной поляризации  $P(\Theta)$  совместно с коэффициентами направленного рассеяния  $\beta(\Theta)$ . Показано, что привлечение поляризационных измерений позволяет улучшить точность восстановления МФП, а также позволяет определять функции распределения как по размерам, так и по объему с погрешностью  $\sim 3\%$ .

В докладе рассматривается применение принципов корреляционной спектрофелометрии для одновременного определения как МФП параметров функции распределения эритроцитов по размерам, так и параметра формы – асферичности эритроцитов, а также возможность упрощения процесса измерений за счет использования только двух коэффициентов направленного рассеяния.

**Расчёт оптических характеристик эритроцитов.** Поскольку ядро интегрального уравнения единичного эритроцита зависит от его ориентации, то обычно при расчетах ОХ используются разные приближения. При этом учитывается, что угловое распределение света, рассеянного на большом числе хаотически расположенных несферических частиц, такое же, как при рассеянии на шарах эквивалентного объема. При этом эритроциты представлены в сферическо-симметричном виде, характеризуются индикатрисой рассеяния, рассчитываемой по формулам Ми. Использование данной модели в других работах и сравнение численных расчетов с экспериментальными результатами показали, что такое приближение хорошо описывает свойства большинства биологических тканей, включая кровь. Отметим также, что для несферических частиц эквивалентные по площади и по объему радиусы не совпадают, однако для умеренно вытянутых (сплюснутых) сфероидов и цилиндров ( $0.5 \leq \kappa \leq 2$ ) эта разница не превышает 5%. Если для модели эритроцитов, представленной в виде эквивалентных по объему сфер, в качестве параметра формы можно считать  $r$ , то для модели, где эритроциты представляются в виде сфероидов, в качестве диагностического параметра формы эритроцита можно использовать параметр асферичности  $e=D/d$ , где  $D$  и  $d$  соответственно большая и малая оси эллипса.

В работе эритроциты моделируются сплюснутыми сфероидами, соответственно ансамбль эритроцитов и его оптические свойства будут моделироваться ансамблем сфероидов со случайно заданными характеристиками большей оси  $D$ , параметра асферичности  $e$ , показателя преломления  $n$  и угла ориентации  $\alpha$ . Распределение эритроцитов по объёму  $f(V)$  моделируется обобщенным гамма-распределением, которое достаточно хорошо аппроксимирует данные многочисленных экспериментальных исследований эритроцитометрических кривых образцов крови. Вариации микроструктурных параметров эритроцитов осуществлялись в диапазонах их возможных изменений, выбранных из литературных данных.

Расчёт элементов матрицы Мюллера и эффективных сечений рассеяния и поглощения производился с помощью программы ADDA на суперкомпьютере СКИФ для эритроцитов со случайно заданными МФП. Всего было рассчитано и занесено в базу данных около 180 000 000 элементов матрицы Мюллера и эффективных сечений рассеяния и по-

глошения единичных эритроцитов. Далее из этого набора формировались ансамбли частиц, где количество рассеивателей задавалось из интервала  $70 \div 120$  тысяч ( $0,02$  мл крови, при средней концентрации  $3.5 \div 6 \times 10^6$  мл<sup>-1</sup>), а каждому рассеивателю случайным образом задавалась ориентация и МФП. Значения коэффициентов рассеяния под углом  $\beta(\Theta)$  для ансамбля частиц из отмеченного выше интервала рассчитывались в приближение однократного рассеяния по правилу сложения индикатрис. Всего было рассчитано 1000 коэффициентов рассеяния под углом  $\beta(\Theta)$ .

**Обсуждение результатов.** Уравнения множественной регрессии для каждого МФП получены с использованием двух коэффициентов направленного рассеяния и имеют соответственно вид:

$$\lg(p) = a_0 + a_1 \lg(\beta(\Theta_1)) + a_2 \lg(\beta(\Theta_2)), (1)$$

где  $a_i$  и  $\Theta_i$  представлены соответственно в таблицах 1 и 2,  $p_i$  - МФП.

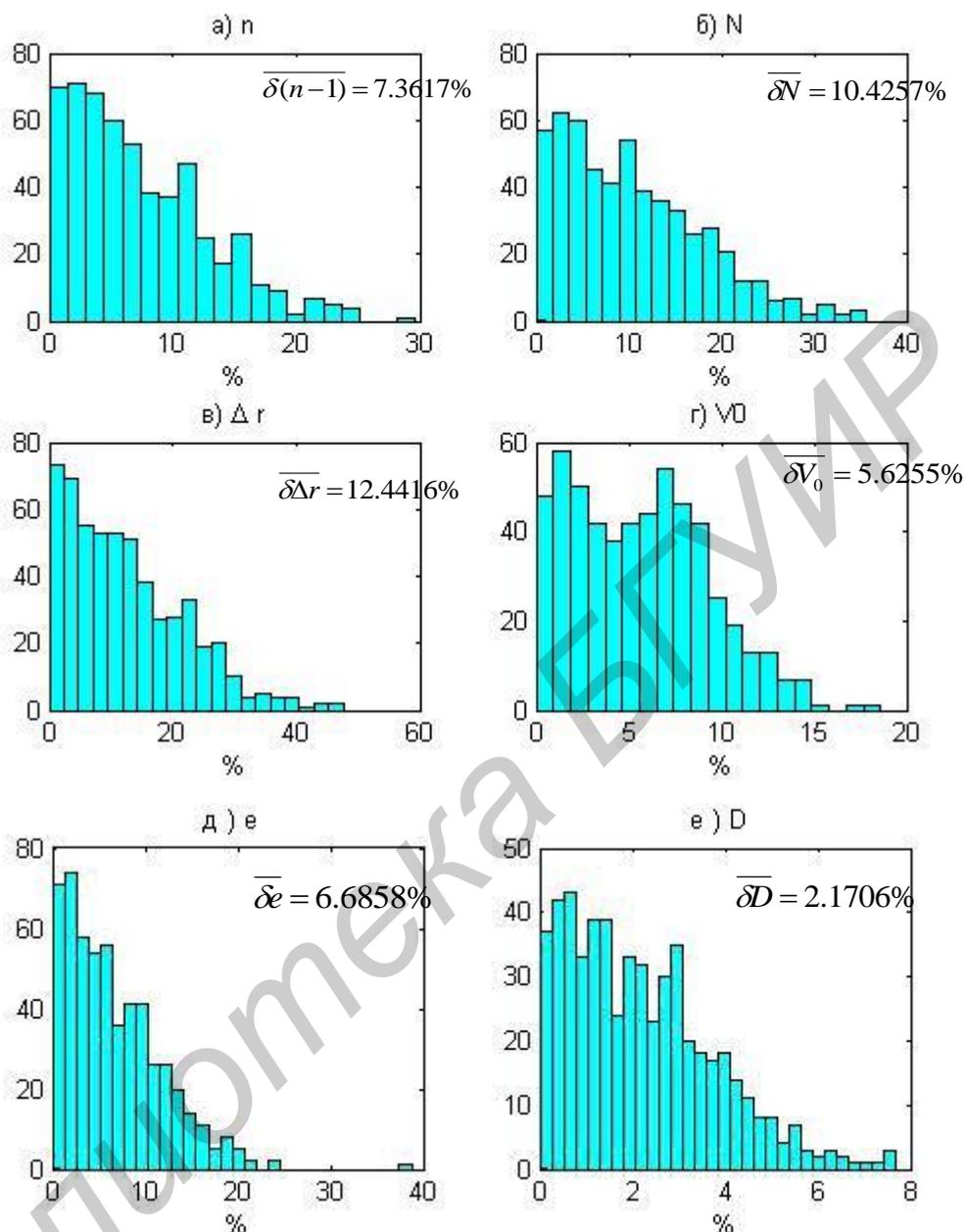
Таблица 1

МФП	$\Theta_1$	$\Theta_2$
$D$	5	12
$e$	5	12
$V_0$	3	9
$\Delta V$	3	9
$n$	7	14
$N$	3	14

Таблица 2

МФП	$a_0$	$a_1$	$a_2$
$D$	2.1892	-0.3208	0.2216
$e$	4.0179	-0.7815	0.4941
$V_0$	0.5708	0.2190	-0.1093
$\Delta V$	1.0552	0.4365	-0.2140
$n$	-4.3541	0.3054	0.0283
$N$	11.4514	-0.8315	0.3205

На рисунке 1 приведены гистограммы погрешности определения МФП с использованием (1), где по оси ОУ отложена частота повторяемости  $P$  ошибок  $\delta = (x - x^*)/x$  (число реализаций  $P$  МФП эритроцитов, для которых получены данные погрешности  $\delta$ ),  $x$  и  $x^*$  – соответственно заданные и рассчитанные с использованием (1) значения МФП. На рисунках также указаны средние по выборке ошибки определения отмеченных только что величин. Как видно, с использованием регрессионных соотношений между угловыми коэффициентами рассеяния и МФП эритроцитов возможно определения таких параметров  $n$ ,  $N$ ,  $\Delta r$ ,  $V_0$ ,  $a$ , значит, и функции распределения по объему в пределах 10%. Однако при этом одновременного с МФП параметров эритроцитов, показателем преломления можно определять и параметры формы – асферичности эритроцитов  $e$ , размер большой оси эллипса  $D$ . При этом средняя по выборке погрешность определения асферичности значительно меньше. Точность восстановления МФП несколько ухудшается, однако важным достоинством рассматриваемого метода является расширение функциональных возможностей, простота технической реализации, оперативность.



**Рисунок 1** - Гистограммы ошибок определения (а)  $n$ ; (б)  $N$ ; (в)  $\Delta r$ ; (г)  $V_0$ ; (д)  $e$ ; (е)  $D$  с использованием уравнения (6) с наложением 10%-х случайных ошибок на  $\beta(\Theta_k)$

Возможность реализации процесса измерений за счет использования только двух коэффициентов направленного рассеяния позволяет создать простую измерительную систему как по одновременному определению параметров функции распределения эритроцитов крови человека по размерам, так параметров их формы, что является неоспоримым преимуществом по сравнению с дорогостоящими и сложными в обслуживании лазерными цифровыми голографическими микроскопами.