

4. Виноградов М.П., Гусев А.В., Милоков В.К. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 5. С. 31 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 5. P. 44.).
5. Виноградов М.П., Гусев А.В., Милоков В.К. // Там же. 1997. № 6. С. 33 (Ibid. 1997. No. 6. P. 41).
6. Aglietta M., Castellina A., Fulgione W. et al. // Nuovo Cimento. 1991. C14. P. 171.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1994.
8. Гусев А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 3. С. 57 (Moscow University Phys. Bull. 1999. No. 3).

Поступила в редакцию
26.06.98

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.36

МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА АНСАМБЛЯМИ АГРЕГИРУЮЩИХ СФЕРОИДОВ. ПРИЛОЖЕНИЕ К ЗАДАЧЕ АГРЕГАЦИИ ЭРИТРОЦИТОВ

В. В. Лопатин, А. В. Приезжев

(кафедра общей физики и волновых процессов)

Предложен метод расчета характеристик многократного рассеяния света на ансамблях агрегирующих сфероидов. С помощью этого метода для случая спонтанной агрегации эритроцитов в цельной крови определены соответствующие индикатрисы рассеяния и зависимость интенсивности рассеянного назад света от времени в процессе агрегации. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Введение

Использование строгой теории светорассеяния даже при незначительном усложнении объекта (например, при переходе от шара к сфероиду) приводит к методическим и вычислительным трудностям, гораздо более серьезным, чем степень усложнения самого объекта. Поэтому необходимо развивать приближенные методы.

Наиболее адекватными и простыми аппроксимациями являются методы Рэлея–Ганса–Дебая (РГД) [1–3], Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна (ВКБ) [4–7] и аномальной дифракции [1–3]. Однако прямое применение этих методов ограничивается случаями, когда рассеяние света можно считать однократным, и приводит к значительным погрешностям при вычислении индикатрисы обратного светорассеяния для частиц, размеры которых значительно превышают длину волны падающего излучения, в частности красных кровяных телец — эритроцитов. В случаях многократного рассеяния, например на достаточно толстых слоях крови, нужно искать новые подходы к описанию процессов рассеяния и поглощения света.

В последнее время исследователи уделяют большое внимание экспериментальному изучению процессов агрегации и дезагрегации эритроцитов методом светорассеяния [8–10]. Различные варианты этого метода развиваются рядом исследовательских групп в нашей стране и за рубежом [8]. Однако сколько-нибудь удовлетворительной теории таких измерений до сих пор нет.

Все приведенные выше обстоятельства, а также отсутствие методики расчета светорассеяния от суспензий агрегирующих эритроцитов, для которых накоплено большое количество теоретически не объяс-

ненного экспериментального материала, в значительной степени предопределили основные направления наших исследований. В настоящей работе представлен метод расчета многократного рассеяния света на ансамблях агрегирующих частиц сфероидальной формы. В качестве примера применения метода выполнен расчет светорассеяния на моделях линейных эритроцитарных агрегатов, длина которых изменяется в процессе агрегации, в условиях, приближенных к экспериментальным, а также расчет индикатрис многократного рассеяния света и зависимости интенсивности рассеянного назад света от времени.

1. Замена ансамбля хаотично ориентированных сфероидальных частиц ансамблем полидисперсных шаров

В работе [11] показано, что взвесь хаотично ориентированных сфероидальных частиц, удовлетворяющих условиям РГД-аппроксимации, по своим оптическим свойствам не отличается от полидисперсной взвеси сферических частиц с распределением по дифракционному параметру ρ_s типа степенного. Плотность этого распределения

$$W(\rho_s) = \frac{\varepsilon^4 \rho_s^5}{(\varepsilon^2 - 1) \rho_s^5} \sqrt{\frac{\varepsilon^2 - 1}{\rho_s^2 \varepsilon^2 - \rho_s^2}}, \quad (1)$$

где ρ — дифракционный параметр сфероида вдоль оси вращения, ε — показатель асферичности сфероида ($\varepsilon = a/b$, b — полуось вращения, a — перпендикулярная ей полуось сфероида), а диапазон изменения ρ_s ограничивается минимальным и максимальным значениями дифракционного параметра сферо-

ида. Аналогичные расчеты для крупных асферичных частиц, проведенные на основе гибридной аппроксимации, использующей соотношения аномальной дифракции [12], также показывают, что такое представление справедливо. Благодаря этому подходу удается значительно понизить сложность вычислений светорассеяния от взвеси сфероидальных частиц без потерь в точности.

2. Оптические характеристики и морфология эритроцитов

С оптической точки зрения цельная кровь представляет собой высококонцентрированную мутную среду, рассеивающие и поглощающие свойства которой определяются главным образом эритроцитами. Показатель преломления эритроцита относительно плазмы — комплексная величина: $m = n + i\chi$. В окне прозрачности (длина волны падающего излучения $\lambda = 0,6 \div 1,5$ мкм) $n = 1,037 \div 1,055$, $\chi = 10^{-5} \div 10^{-4}$ [13]. Поскольку действительная часть относительного показателя преломления близка к единице, эритроцит является оптически «мягкой» частицей.

Нормальный эритроцит человека в покоящейся плазме имеет двояковогнутую дискоидную форму («дискоцит»). Размеры эритроцитов неодинаковы: диаметр $7,1 \div 9,2$ мкм (в среднем около 8 мкм), толщина на утолщенном крае около $1,7 \div 2,4$ мкм и в центре $0,9 \div 1,2$ мкм. Объем эритроцитов составляет $70 \div 100$ мкм³.

При отсутствии сильных сдвиговых напряжений эритроциты в плазме агрегируют, образуя линейные структуры по типу «монетных столбиков». Характерный вид линейного агрегата приведен на рис. 1; размеры агрегатов могут быть небольшими, но возможно образование и крупных, состоящих из множества «монетных столбиков» агрегатов.



Рис. 1. Характерный вид линейного агрегата

Для построения модели рассеивающей среды необходимо знать зависимость роста эритроцитарных агрегатов, точнее, увеличения числа эритро-

цитов в агрегате от времени, $N(t)$. В ряде работ рассматривалась кинетика агрегации с гамма-распределением агрегатов по размерам. Воспользуемся этим приближением. Мы также будем считать, что эта зависимость задается функцией распределения $F(N) = N \exp(-\sigma N)$, где N — число эритроцитов в агрегате, максимальное значение которого N_{\max} увеличивается пропорционально времени: $N_{\max} = 1 + \beta t$. Коэффициент β рассчитывается из экспериментальных данных: за время порядка 15 с обычно образуются линейные агрегаты не более чем из 20 эритроцитов. Показатель экспоненты σ подбирается таким образом, чтобы полученные кривые временной зависимости интенсивности света, рассеянного в диапазоне углов $110^\circ \leq \theta \leq 140^\circ$, соответствующем конструкции детектирующей головки прибора, совпадали с экспериментальными [8]. Полученные таким способом зависимости гамма-распределения эритроцитарных агрегатов от их длины в различные моменты времени t после начала агрегации представлены на рис. 2.

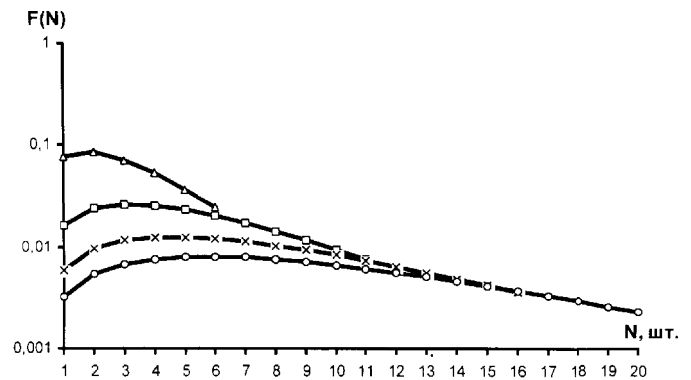


Рис. 2. Гамма-распределение ($\sigma = 1,4$) линейных эритроцитарных агрегатов по размерам в различные моменты времени после начала агрегации: $t = 3,75$ с (треугольники); 7,5 с (квадраты); 11,75 с (крестики); 15 с (кружочки) в полулогарифмическом масштабе

Поскольку точное решение задачи о рассеянии света частицами столь сложной и нерегулярной формы отсутствует, приходится строить некоторую модель эритроцита и агрегатов, а расчет светорассеяния вести с помощью приближенных методов.

3. Модель и налагаемые ограничения

Будем моделировать процесс многократного рассеяния света на достаточно толстом (~ 1 мм) слое крови. В расчетах длина волны падающего излучения $\lambda = 0,6328$ мкм. Толщина слоя выбрана из условий эксперимента [8]. Считаем, что луч света падал на образец по нормали к поверхности среды. Угол рассеяния отсчитывается от направления падающего луча в плоскости рассеяния.

Разобьем среду на такие тонкие слои, что рассеяние в одном слое можно считать однократным. Будем предполагать, что эритроциты и их агрегаты хаотично ориентированы в этих слоях; в ходе агрегации эритроциты образуют только линейные агрегаты по типу «монетных столбиков»; линейные агрегаты имеют гамма-распределение по размерам (длинам). Используемая модель состоит в следующем:

а) дезагрегированные и недеформированные эритроциты моделируются сфероидами с показателем асферичности $\epsilon = 4$ и полуосью $a = 4$ мкм; после агрегации этих сфероидов образуются сфероиды с различными полуосями симметрии b , при этом полуось a остается неизменной;

б) взвесь хаотично ориентированных сфероидальных частиц по своим оптическим свойствам не отличается от полидисперсной взвеси сферических частиц с распределением по дифракционному параметру ρ_s типа степенного, плотность которого имеет вид (1);

в) слои в оптическом отношении тождественны.

Расчет светорассеяния от полученных таким образом сферических частиц ведется по строгой теории Ми для шара [1, 3].

Многократность рассеяния будем моделировать следующим образом. Коллимированный пучок света входит в среду. В первом слое (ближайшем к излучателю) рассеяние пучка считаем однократным. Индикатриса рассеяния в этом случае разбивается на 360 частей, соответствующих 360 лучам, идущим под углами $0, 1^\circ, 2^\circ, \dots, 359^\circ$ с соответствующими интенсивностями. Лучи, идущие в заднюю полуплоскость, выйдут из среды. Лучи, идущие в переднюю полуплоскость, рассеиваются во втором слое в первый и третий в соответствии с той же индикатрисой монослоя, но сдвинутой на угол φ , под которым луч вошел во второй слой. Далее рассматриваем лучи, рассеянные в переднюю и заднюю полуплоскости в третьем и первом слоях и т.д. Задавая определенное количество слоев, можно получить индикатрису многократного рассеяния света толстым слоем суспензии и следить за ее изменением в зависимости от количества выбранных слоев.

4. Результаты и их обсуждение

Угловая зависимость интенсивности многократно рассеянного света. Для взвеси эритроцитарных агрегатов, которая образуется через 9 с после начала процесса агрегации, в интересующей нас области углов рассеяния, больших 90° , индикатриса светорассеяния для модельной среды, состоящей из 10 слоев, практически параллельна индикатрисе для пяти слоев (с погрешностью не более 5%), и, следовательно, она не несет дополнительной информации о взвеси по сравнению с индикатрисой для 5 слоев (рис. 3, а). При этом видно, что второй и следующий слой вносят все меньший вклад в полную интенсивность обратного светорассеяния. Важно еще отметить значительное сглаживание осцилляций индикатрисы, особенно в области углов рассеяния, меньших 90° . Аналогичные результаты получаются и для любого другого момента времени t в процессе агрегации. Индикатрисы, соответствующие случаю полностью дезагрегированных эритроцитов ($t = 0$), приведены на рис. 3, б.

Зависимость интенсивности рассеянного назад света от времени. Полученная нами временная зависимость интенсивности обратного светорассеяния (для 5 слоев в модели) в сравнении с кривой, полученной в эксперименте [8], представлена на рис. 4.

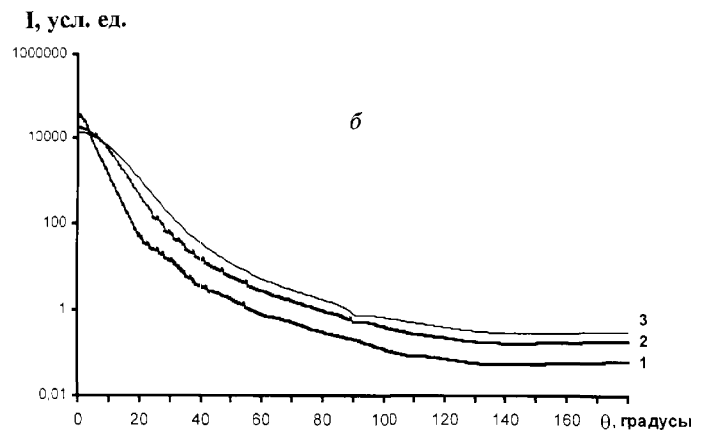
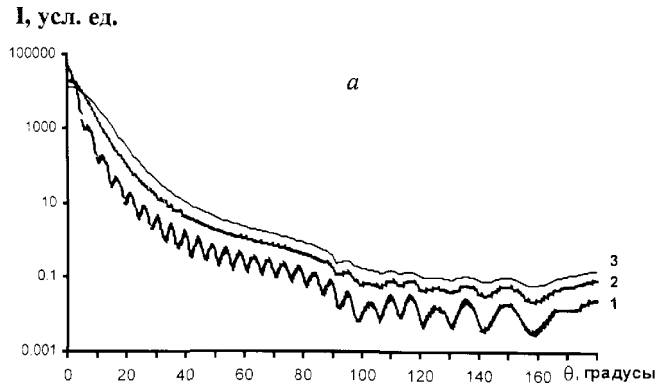


Рис. 3. Индикатрисы многократного рассеяния света взвесью эритроцитарных агрегатов при $t = 9$ с (а) и взвесью дезагрегированных эритроцитов (б), построенные в полулогарифмическом масштабе, в зависимости от количества выбранных слоев: 1 (1), 5 (2) и 10 слоев (3)

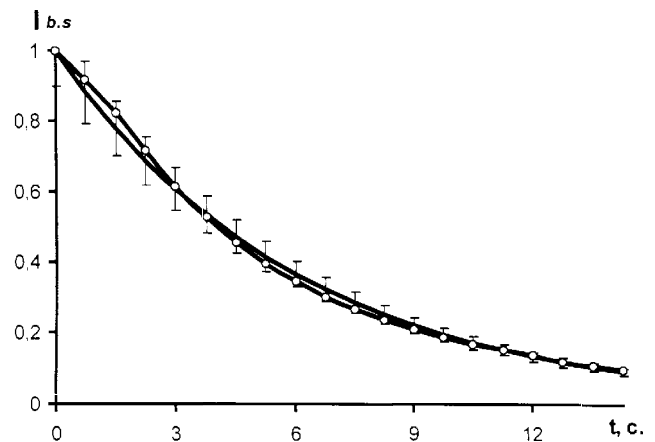


Рис. 4. Зависимость нормированной на единицу интенсивности рассеянного назад света от времени после начала агрегации. Экспериментальная кривая [8] (сплошная линия) и теоретическая кривая для 5 слоев в модели (кружочки)

Интегрирование проводилось в диапазоне углов рассеяния $110^\circ \leq \theta \leq 140^\circ$, соответствующем конструкции детектирующей головки прибора в эксперименте [8]. Время отсчитывается от начала процесса агрегации. Расчетные кривые при 10 выбранных в модели слоях были практически такими же (отличие в значениях интенсивностей не превышало 5%) и поэтому здесь не приводятся. Таким образом, достаточно рассмотреть рассеяние лишь в первых 5 слоях по отношению к приемно-передающему устройству.

Расчетная и экспериментальная кривые совпадают в пределах погрешности эксперимента (10%), показанной на рис. 4. Поэтому наблюдаемое различие несущественно, и можно сделать вывод, что осуществляемое в эксперименте распределение агрегатов по размерам близко к гамма-распределению с $\sigma = 1,4$ (см. рис. 2).

Заключение

В работе представлен метод расчета характеристик многократного рассеяния света на взвеси хаотично ориентированных сфероидальных частиц, в частности в суспензии агрегирующих эритроцитов.

Рассчитаны угловые зависимости интенсивности многократно рассеянного света для взвеси агрегирующих эритроцитов от количества выбранных в модели слоев и теоретическая кривая интенсивности рассеянного назад света от времени.

Показано, что для условий данной задачи достаточно учесть лишь несколько ближайших к приемно-передающему устройству слоев и что распределение числа эритроцитов в агрегатах в условиях спонтанной агрегации близко к гамма-распределению с $\sigma = 1,4$.

Применение представленного метода не ограничивается случаем спонтанной агрегации эритроцитов в цельной крови. Разработанные алгоритмы и компьютерная программа позволяют проводить расчет многократного рассеяния не только для клеток крови, но и для большого количества других объектов живого микромира — бактерий и спор, дрожжей, растительных и животных клеток, микроводорослей и других объектов, форма которых близка к сфероидальной.

Работа выполнена при частичной поддержке грантом РФФИ «Научные школы» (96-15-97782).

Литература

1. Лопатин В.Н., Сидько Ф.Я. Введение в оптику взвесей клеток. Новосибирск: Наука, 1988.
2. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986.
3. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ, 1961.
4. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. Ч. 1.
5. Lopatin V.N., Shepelevitch N.A., Lopatin V.V. // Proc. Intern. Workshop «Electromagnetic and light scattering: theory and application». M., Russia, 1997. P. 67.
6. Shepelevitch N.A., Lopatin V.N., Maltsev V.P., Lopatin V.V. // J. Opt. A.: Pure Appl. Opt. 1999. 1. P. 1.
7. Lopatin V.N., Shepelevitch N.A., Lopatin V.V. // Proc. 8th Intern. Symp. «Homeostasis and Environment». Krasnoyarsk, Russia, 1997. P. 54.
8. Firsov N.N., Priezhev A.V., Ryaboshapka O.M. Optical Methods of Biomedical Diagnostics and Therapy // Proc. SPIE. 1993. 1981. P. 17.
9. Приезжев А.В., Рябошанка О.М., Сирко И.В., Фирсов Н.Н. // Изв. РАН, сер. физ. 1995. 59, № 6. С. 165.
10. Рябошанка О.М. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1996.
11. Сидько Ф.Я., Лопатин В.Н., Парамонов Л.Е. Поляризационные характеристики взвесей биологических частиц. Новосибирск: Наука, 1990.
12. Latimer P., Barber P.W // J. Coll. Interf. Sci. 1978. 63, No. 2. P. 310.
13. Королевич А.Н., Хайруллина А.Я., Шубочкин Л.П. // Опт. и спектр. 1990. 68, № 2. С. 403.

Поступила в редакцию
29.07.98

УДК 621.373.826

АНАЛИЗ ОДНОЙ МОДЕЛИ КОЛЛЕКТИВНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ РЕШЕТОК С ДИФРАКЦИОННОЙ СВЯЗЬЮ

В. П. Кандидов, А. В. Кондратьев

(кафедра общей физики и волновых процессов)

На основе динамической модели для лазерных решеток с дифракционной связью развита методика исследования переходного процесса от спонтанного излучения отдельных каналов к коллективной генерации. Характер и длительность переходного процесса определяются соотношением между фактором селективности системы и превышением инкремента усиления над порогом генерации. Показано, что традиционная динамическая модель коллективной генерации приводит к результатам, противоречащим экспериментальным данным.

Введение

Использование дифракционного обмена излучением между каналами лазерных решеток, помещенных в общий резонатор Тальбо [1, 2], является эффективным средством их фазовой синхронизации. При анализе динамики коллективной генерации таких систем обычно исследуют устойчивость стационарного режима. В рамках модели среднего поля,

инжектируемого в элементы структуры, рассмотрено влияние разброса собственных частот [3] и их временных флуктуаций [4] на установившуюся генерацию одномерных и двумерных лазерных решеток. При анализе линеек из большого числа лазеров используется модель непрерывной активной среды с поперечной диффузией излучения [4, 5].

Актуальным представляется изучение характера и длительности процесса установления коллективной