

## ФИЗИКА

УДК 541.182:535.36

*О. С. Везо, В. В. Войтылов, М. П. Петров, А. А. Трусов, А. В. Войтылов***МОЛЕКУЛЯРНО-ОПТИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИИ ВОДНЫХ ДИСПЕРСИЙ С ЧАСТИЦАМИ НАНОАЛМАЗА\***

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Проведены исследования показателя преломления коллоидов, содержащих частицы восьми отдельных фракций, выделенных из дисперсной фазы детонационного алмаза. Дано теоретическое описание рефракции коллоидов в рамках молекулярной оптики. Экспериментально показано, что во всех восьми исследованных фракциях показатель преломления главным образом определяется частицами, размеры которых много меньше длины световой волны. Более крупные частицы слабо влияют на показатель преломления коллоидов, но определяют их цвет и мутность. Проведены расчёты показателя преломления коллоидов, использующие молекулярно-оптическую теорию. При расчётах полагалось, что дисперсная фаза коллоидов содержит алмаз и графит. Экспериментальные результаты согласуются с результатами расчётов. Библиогр. 29 назв. Ил. 3. Табл. 2.

*Ключевые слова:* коллоид, показатель преломления, инкремент показателя преломления, приближение молекулярной оптики, наночастицы алмаза, электрический дихроизм.

**Для цитирования:** *Везо О. С., Войтылов В. В., Петров М. П., Трусов А. А., Войтылов А. В.* Молекулярно-оптический подход в исследовании водных дисперсий с частицами наноалмаза // Вестник СПбГУ. Физика и химия. 2017. Т. 4 (62). Вып. 4. С. 366–376.  
<https://doi.org/10.21638/11701/spbu04.2017.401>

*O. S. Vezo, V. V. Vojtylov, M. P. Petrov, A. A. Trusov, A. V. Voitylov***MOLECULAR-OPTICAL APPROACH IN THE RESEARCH OF WATER DISPERSIONS WITH PARTICLES OF NANODIAMOND**

St. Petersburg State University,  
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

The refractive index of colloids containing particles of eight separate fractions obtained from the dispersed phase of detonation diamond was studied. An analysis of the theoretical description of refraction of colloids in the framework of molecular optics is carried out. It was shown experimentally that in all eight fractions that were studied the refractive index is mainly determined by

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-03-00495а.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2017

particles and aggregates of them with size less than light wave length. Larger particles have little effect on the refractive index of colloids, but determine their color and turbidity. Calculations of the refractive index of colloids using a theory of molecular optics have been carried out. In these calculations it was assumed that the dispersed phase of the colloids contained diamond and graphite. The experimental results are in agreement with the results of these. Refs 29. Figs 3. Tables 2.

*Keywords:* colloid, refractive index, increment of refractive index, molecular optical approach, diamond nanoparticles, electric dichroism.

**For citation:** Vezo O. S., Vojtylov V. V., Petrov M. P., Trusov A. A., Voitylov A. V. Molecular-optical approach in the research of water dispersions with particles of nanodiamond. *Vestnik SPbSU. Physics and Chemistry*. 2017. Vol. 4 (62), iss. 4. P. 366–376.

<https://doi.org/10.21638/11701/spbu04.2017.401>

**Введение.** Оптические исследования коллоидов алмаза широко используются при анализе дисперсной фазы алмаза, получаемой различными методами [1–4]. Водные коллоиды алмаза, включающие отдельные наночастицы и жёсткие агрегаты из них с размерами менее 0,5 мкм, устойчивы при низкой концентрации ионов в коллоиде. Они обладают ярко выраженными оптическими свойствами, основанными на люминисценции наноалмаза [5–9] и особенностях рассеяния света коллоидами [10–13]. Эти особенности делают информативными оптические исследования наноалмазов.

Наиболее часто используется детонационный алмаз. В ходе синтеза детонационного алмаза на стадии падения давления и температуры одна его часть переходит в графит [14, 15], а другая имеет сложный состав с кристаллическим алмазом внутри и графитовой оболочкой снаружи. Частицы графита, так же как и частицы алмаза, можно считать изотропными и состоящими из более мелких монокристаллов, а показатель преломления алмаза близок к среднему значению показателя преломления графита [16].

Образовавшуюся в ходе детонации дисперсную фазу наноалмаза можно разделить на отдельные фракции, частицы которых различаются по размеру и составу. Эти частицы широко используются в технике, а разбавленные коллоиды с наночастицами алмаза перспективны для использования в медицине. В связи с этим необходимы быстрые и точные методы анализа концентрации частиц алмаза в коллоидах. При исследовании истинных растворов наиболее часто используют рефрактометрический метод. Задача проводимых нами исследований — определить, в какой степени такой молекулярно-оптический подход применим к анализу водных коллоидов, содержащих частицы детонационного алмаза.

**Теоретическая часть.** Коллоиды оптически неоднородны, и если концентрация частиц недостаточно низка для измерений, то световой луч, проходящий сквозь них, становится размытым, так как интенсивность когерентного света падает, а диффузно рассеянного — возрастает. Если размеры частиц в несколько раз меньше длины световой волны, то можно определять показатель преломления коллоидов при объёмной доле частиц, составляющей сотые доли процента, а при увеличении размеров частиц допустимая для измерений их объёмная доля резко падает. Определять объёмную долю частиц можно, измеряя плотности коллоида  $\rho$ , дисперсной фазы  $\rho_p$  и дисперсионной среды  $\rho_0$ . Они связаны с объёмом коллоида  $V$  и объёмом частиц  $\Delta V$  в коллоиде соотношением

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_p - \rho_0}. \quad (1)$$

Коллоиды с частицами менее 10–20 нм близки к оптически однородным системам, и можно предположить, что поля, поляризующие такие частицы и молекулы, одинаковы, а рефракцию коллоидов следует рассчитывать так же, как и рефракцию

молекулярных растворов [17]. Увеличение размеров частиц делает коллоид оптически неоднородным, из-за чего необходимо различать поля, действующие на молекулы дисперсионной среды и дисперсной фазы, однако поле рассеянных частицами световых волн может оставаться несущественным по сравнению с полем падающей световой волны, если концентрация частиц в коллоиде мала. Дальнейшее увеличение размеров частиц делает необходимым учёт поля диффузного рассеяния. Здесь мы ограничимся молекулярно-оптическим подходом, в котором диффузное рассеяние не учитывается.

В рамках молекулярно-оптической теории показатель преломления коллоида  $n$  связан с его поляризацией  $\vec{P}$  и полем световой волны  $\vec{E}$  соотношением

$$(n^2 - 1)\vec{E} = 4\pi\vec{P}.$$

(Здесь использована система измерений CGSE.)

В оптически неоднородных коллоидах этим соотношением связаны средние значения  $\vec{E}$  и  $\vec{P}$ . Показатель преломления  $n$  — это также усреднённая по объёму характеристика, и его экспериментальное определение при изучении преломления, отражения и распространения световой волны может привести к разным значениям, так как усреднение может проводиться по разным объёмам.

Если полагать, что эффективное поле  $\vec{F}$ , действующее на частицы и молекулы среды, — это поле Лорентца [18], то

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{n_0^2 - 1}{n_0^2 + 2} \left(1 - \frac{\Delta V}{V}\right) + \frac{n_p^2 - 1}{n_p^2 + 2} \frac{\Delta V}{V}, \quad (2)$$

где  $n_0$  и  $n_p$  — показатели преломления дисперсионной среды и вещества частиц соответственно.

Для коллоидов с низкой концентрацией частиц можно полагать, что

$$(n^2 + 2)/(n_0^2 + 2) \approx 1,$$

и, учитывая (1), можно записать

$$\frac{n^2 - n_0^2}{\rho - \rho_0} = \frac{n_0^2 + 2}{\rho_p - \rho_0} \left( \frac{n_p^2 - 1}{n_p^2 + 2} - \frac{n_0^2 - 1}{n_0^2 + 2} \right). \quad (3)$$

Увеличение размеров частиц уменьшает различие между действующими на частицы полями  $\vec{F}$  и  $\vec{E}$ . Будем полагать, что для частиц  $\vec{F} \approx \vec{E}$ , а для молекул это по-прежнему поле Лорентца  $\vec{F} = (n^2 + 2)\vec{E}/3$ . В этом случае

$$(n^2 - 1)\vec{E} = (n_0^2 - 1)\vec{E} \left(1 - \frac{\Delta V}{V}\right) + 4\pi N_p \langle \vec{d} \rangle, \quad (4)$$

где  $N_p$  — счётная концентрация частиц, а  $\langle \vec{d} \rangle$  — среднее значение их дипольного момента в поле световой волны.

Полагая частицы изотропными эллипсоидами, хаотически ориентированными в коллоиде, можем записать

$$\langle \vec{d} \rangle = \frac{\bar{v}\vec{E}}{4\pi} \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \beta_i, \quad (5)$$

где  $\bar{v}$  — средний объём частицы,

$$\beta_i = \frac{n_p^2 - n_0^2}{n_0^2 + (n_p^2 - n_0^2)A_i}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (6)$$

$A_i$  — факторы деполяризации частицы, которые определяются отношениями полуосей эллипсоида [19].

Учитывая (1) и полагая, что

$$\bar{\beta} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \beta_i,$$

вместо формулы (3) имеем

$$\frac{n^2 - n_0^2}{\rho - \rho_0} = \frac{1 + \bar{\beta} - n_0^2}{\rho_p - \rho_0}. \quad (7)$$

Правая часть в соотношениях (3) и (7) рассчитывается теоретически, а левая измеряется экспериментально при разных концентрациях дисперсной фазы  $C_p$ . При низкой концентрации  $C_p$  частиц в коллоиде и близких значениях  $n$  и  $n_0$  зависимости показателя преломления и плотности коллоида от концентрации  $C_p$  линейны, а левую часть (7) можно выразить через инкременты этих величин, измеряемых экспериментально:

$$\frac{n^2 - n_0^2}{\rho - \rho_0} = 2n_0 \frac{dn}{d\rho} = 2n_0 \frac{dn/dC_p}{d\rho/dC_p}. \quad (8)$$

Соотношение (7) можно рассматривать как приближённое, и рамки его применимости такие же, как и в случае релеевского рассеяния.

**Техника и методика эксперимента.** Для измерения показателя преломления света используются несколько способов [20–22]. В коллоидах результаты измерений показателя преломления могут зависеть от способа измерений и концентрации частиц. Для того чтобы исключить это, мы использовали три метода измерений. Первые два метода связаны с определением угла полного внутреннего отражения (рефрактометр Abbemat WR/MW, точность измерения  $\Delta n = 4 \cdot 10^{-5}$ ) и угла преломления скользящего луча (самодельный рефрактометр, точность измерения  $\Delta n = 2 \cdot 10^{-6}$ ). Третий метод, интерферометрический, использован для определения разности показателей преломления коллоида и чистой дисперсионной среды (интерферометр ITR-2, точность измерения  $\Delta n = 1 \cdot 10^{-6}$ ). Первый и второй методы хотя и имели меньшую точность, чем третий, но позволяли проводить исследования при существенно более высоких концентрациях частиц.

Измерения плотности коллоида и дисперсионной среды проводились с точностью  $5 \cdot 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup> (прибор DMA 5000). При определении плотности  $\rho_0$  необходимо отделить дисперсионную среду от дисперсной фазы. Для этого была использована ультрацентрифуга (Sigma 1–14), центробежное поле которой достигало 15 000*g* и более. При определении  $\rho_0$  коллоиды выпаривались, и определялись масса и объём дисперсной фазы.

Определение размеров частиц и оценка полидисперсности коллоидов осуществлялись двумя методами. В первом методе исследовалось динамическое светорассеяние, в котором автокорреляционные функции интенсивности рассеянного света определялись прибором Photocor Complex. Вторым методом, электрооптическим, экспериментально определялись кривые релаксации дихроизма коллоидов, наведённого внешним электрическим полем и связанного с появлением в поле ориентационной упорядоченности частиц коллоида. Для проведения электрооптических исследований использована экспериментальная установка, собранная в лаборатории. Релаксационные кривые, также как автокорреляционные функции, позволяют определять распределения по размерам частиц и агрегатов из них, которые могут образоваться в коллоидах [23–25]. Электрооптический метод также успешно используется при анализе устойчивости

коллоидов и исследовании поляризуемости частиц и адсорбции на них молекул ПАВ [26–28].

Для определения формы частиц использовались их изображения, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа.

**Коллоиды для исследования.** Для получения коллоидов был использован абразивный порошок алмаза, полученный детонационным методом. В состав частиц входили как алмаз, так и графит, а размеры частиц варьировались в широких пределах. Дисперсная фаза освобождалась от побочных примесей путём центрифугирования водной взвеси порошка. Далее приготавливался исходный водный коллоид с высокой концентрацией частиц детонационного алмаза, который отстаивался в высоком прозрачном стакане. При седиментации частиц исходный коллоид разделялся на горизонтальные слои разных цветов и оттенков. Слои имели чётко выраженные границы, толщина которых была много меньше толщины слоёв. Число слоёв обычно зависит от способа получения алмаза и времени отстаивания. В коллоиде с частицами алмаза, выбранного нами для исследований, через две недели отстаивания образовалось восемь слоёв. Нижние два слоя были светло-серыми, а верхние шесть были более тёмными, но границы между ними были хорошо различимы при освещении коллоида естественным светом. Из каждого слоя была взята проба, из которой приготавливался образец водного коллоида для исследований. Нумерация коллоидов от № 1 до № 8 задаётся от верхнего слоя к нижнему. Перед исследованиями каждый коллоид взбалтывался и подвергался акустической обработке в течение 5 мин в ультразвуковой ванне с частотой колебаний 22 кГц. В ходе исследований концентрация частиц в коллоидах понижалась путём разбавления, и коллоиды снова подвергались акустической обработке с целью исключить возможное влияние седиментации и коагуляции на результаты измерений. Концентрация частиц в коллоидах и длина оптического пути не превышали значений, при которых рассеяние света можно было считать однократным. В этом случае при уменьшении концентрации частиц в коллоиде коэффициент ослабления света меняется пропорционально концентрации частиц.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Правые части формул (3) и (7) рассчитывались для алмаза и графита, так как частицы детонационного алмаза имеют оболочку из поликристаллического графита, а их доли для разных частиц могли различаться. Показатели преломления  $n_p$  алмаза и графита, согласно литературным данным [16, 29], равны 2,42 и 2,68 соответственно, а плотности  $\rho_p$  — 3,52 и 2,23. Значения  $n_0$  и  $\rho_0$  соответствовали воде. Были получены электронно-микроскопические снимки частиц, по которым определялись отношения полуосей при аппроксимации частиц эллипсоидами вращения, необходимые для расчётов по формуле (7). Корреляции между размерами и параметрами формы частиц не наблюдалось. На рис. 1 приведены снимок частиц на подложке (слева) и гистограмма распределения числа частиц по отношению полуосей эллипсоидов вращения  $p$  (справа), которая использовалась при расчётах  $dn/dp$  по формуле (7).

Таблица 1

Значения  $dn/dp$ , см<sup>3</sup>/г

Вид частиц	Формула (3)	Формула (7)
Алмаз	0,21	0,10
Графит	0,48	0,19

Результаты расчётов по формулам (3) и (7) приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что для алмаза и для графита значения  $dn/dp$ , рассчитанные по формуле (3), отличны от значений, рассчитанных по формуле (7), более чем в 2 раза.

Для проверки применимости (3) и (7) к исследуемым коллоидам были сопоставлены рассчитанные и экспериментально определённые значения  $dn/dp$  для всех восьми

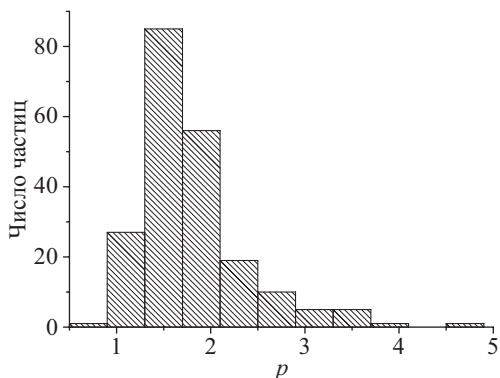
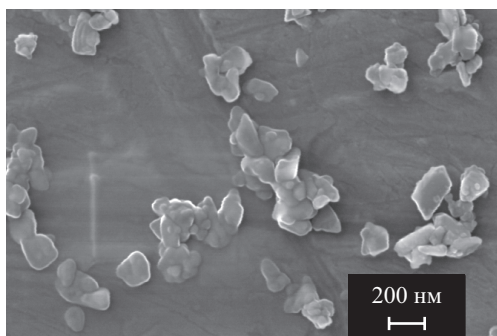


Рис. 1. Результаты электронно-микроскопических исследований

образцов. Как показали исследования, проведённые электрооптическим методом и методом динамического светорассеяния, распределения частиц по размерам в приготовленных образцах различаются. На рис. 2 слева приведены релаксационные зависимости электрического дихроизма  $N$ , нормированные по максимальным значениям  $N_{\max}$ , отвечающим полной ориентации частиц в поле. Справа приведены рассчитанные по этим зависимостям функции распределения частиц по размерам с дихроическим весом  $\varphi(r)$ . Здесь  $r$  — радиус сферы, константа вращательной диффузии которой совпадает с константой вращательной диффузии частицы. Измерения проводились в белом свете. Это позволяет полагать, что дихроический вес меняется пропорционально  $r^2$  [25]. Функции распределения частиц по размерам, определённые электрооптическим методом и методом динамического светорассеяния, согласуются для всех восьми образцов.

При экспериментальном определении  $dn/d\rho$  показатели преломления и плотности коллоидов и дисперсионной среды измерялись при одинаковой температуре  $20^\circ\text{C}$ , чтобы исключить влияние температуры на результаты измерений. Было исследовано, в какой степени экспериментально определяемый показатель преломления коллоидов зависит от способа его измерения. Как показала проверка, для всех приготовленных коллоидов различия между значениями показателя преломления, измеренными при длине

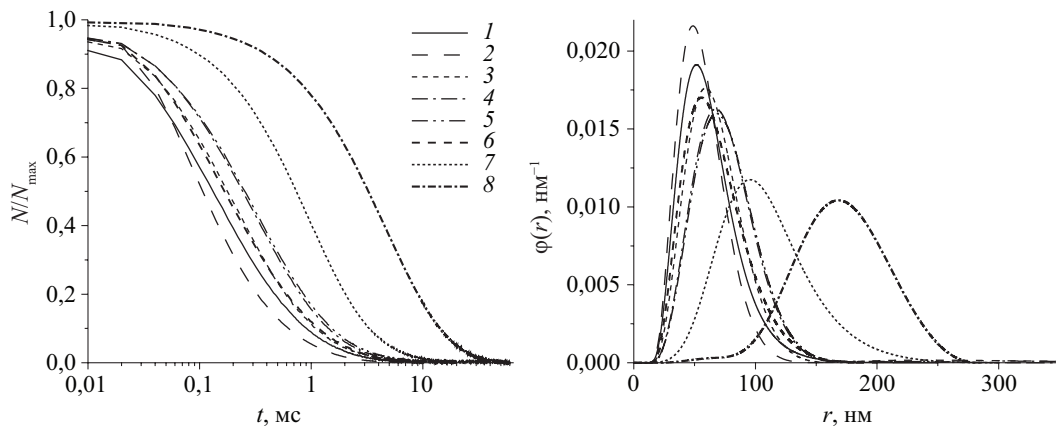


Рис. 2. Результаты электрооптических исследований:  
1–8 — номера образцов

световой волны 657,9 нм, по углу полного внутреннего отражения (1-м способом) и углу преломления (2-м способом) не превышали  $5 \cdot 10^{-5}$ . Различия между результатами измерений, полученными 2-м и 3-м, интерферометрическим, способами, не превышали  $3 \cdot 10^{-6}$ . Исследования показателя преломления проводились только для коллоидов с низкой концентрацией частиц, для которых плоский волновой фронт падающей световой волны оставался плоским при распространении света в коллоиде. Максимально допустимая объёмная доля частиц в коллоидах зависела от мутности образцов № 1–7. В образце № 8 рассеяние света было велико, и для него определить показатель преломления не удавалось. Однако удаление из этого образца крупных частиц, сильно рассеивающих свет, позволило проводить измерения показателя преломления.

Предельно высокие концентрации частиц  $C_{\max}$ , при которых возможно было проводить измерения показателя преломления, для разных образцов были различны. При значениях  $C_p < C_{\max}$  зависимости  $\rho$  и  $n$  от концентрации частиц  $C_p$  были линейны. Типичные зависимости такого типа приведены на рис. 3. Представленные на рисунке значения  $n$  соответствуют длине волны  $\lambda = 657,9$  нм.

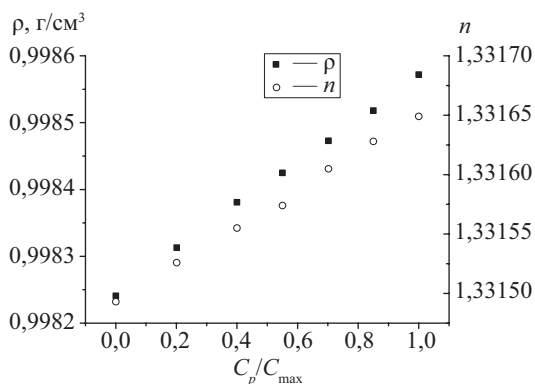


Рис. 3. Зависимости  $n$  и  $\rho$  от относительной концентрации  $C_p/C_{\max}$

В табл. 2 представлены экспериментально полученные значения  $dn/d\rho$  и максимально допустимые доли дисперсной в образцах  $\Delta V_{\max}/V$ .

Таблица 2

Значения  $dn/d\rho$  и предельно допустимые значения  $\Delta V_{\max}/V$

Параметр	Номер коллоида							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$dn/d\rho$ , см <sup>3</sup> /г	0,49	0,44	0,45	0,44	0,48	0,44	0,43	—
$\Delta V_{\max}/V \times 10^4$	3,3	1,9	0,66	3,5	0,8	2,5	0,46	0,33

Как видно из таблицы, значение  $dn/d\rho$  для образцов № 1–7 меняется на несколько процентов, в то время как значения  $\Delta V_{\max}/V$  меняются в несколько раз. Это позволяет предположить, что соизмеримые с длиной волны света частицы слабо влияют на показатель преломления. Частицы с размерами много меньше длины световой волны вносят основной вклад в показатель преломления исследованных коллоидов. Согласно электронно-микроскопическим изображениям, исследованиям методами динамического светорассеяния и дихроизма в электрическом поле, доля мелких частиц велика, и именно они определяют разность плотностей  $\rho - \rho_0$ .



Для того чтобы проверить это предположение, из коллоидов удалялись крупные частицы путём центрифугирования, что существенно повысило значения  $\Delta V_{\max}/V$  для них. После осаждения крупных частиц в центробежном поле  $15\,000g$  в течение 5 мин в исследованных образцах оставались только частицы с размерами  $r < 30$  нм, если полагать, что плотность  $\rho_p$  соответствует алмазу и  $r < 60$  нм в случае графита. Экспериментально измеренные значения  $dn/dr$  для образцов 1–7 слабо изменились. Для образца 8, для которого без центрифугирования провести измерения не удавалось, после центрифугирования значение  $dn/dr$  составило  $0,44 \pm 0,01$  см<sup>3</sup>/г. Если сопоставить средние значения  $dn/dr$ , то до центрифугирования оно составило  $0,45 \pm 0,01$  см<sup>3</sup>/г, а после центрифугирования —  $0,40 \pm 0,08$  см<sup>3</sup>/г. После центрифугирования образца 4 в центробежном поле  $15\,000g$  в течение 1 ч в нём остались только мелкие частицы с размерами  $r < 12$  нм в случае частиц алмаза и  $r < 25$  нм в случае частиц графита. Измеренное для этого образца значение инкремента показателя преломления составляло  $0,41 \pm 0,01$  см<sup>3</sup>/г. Так как измеренные значения  $dn/dr$  центрифугированных и нецентрифугированных образцов близки, то можно заключить, что основной вклад в  $dn/dr$  во всех исследованных коллоидах вносят частицы с размерами, много меньшими длины световой волны, а более крупные частицы, соизмеримые с длиной световой волны, слабо влияют на показатель преломления коллоидов.

Если сопоставить результаты измерений и расчётов, приведённых в табл. 1, то можно видеть, что измеренные значения  $dn/dr$  лежат между рассчитанными по формуле (3) значениями для алмаза и графита. Это указывает на то, что в использованной нами дисперсной фазе детонационного алмаза существенную долю составляет графит, что согласуется с результатами ранее проводимых исследований структуры таких частиц [2]. Результаты расчётов, выполненных с использованием формулы (7), занижены, что свидетельствует о том, что для частиц, существенно влияющих на показатель преломления коллоида, поляризующее их поле выше электрического поля световой волны.

**Выводы.** По результатам исследования водных коллоидов алмаза можно заключить, что молекулярно-оптический подход применим к исследованию рефракции водных коллоидов детонационного алмаза, если полагать, что электрические поля, поляризующие частицы и молекулы, близки. Основной вклад в инкремент показателя преломления вносят частицы с размерами много меньшими длины световой волны, а более крупные частицы слабо влияют на рефракцию коллоидов.

\* \* \*

Исследования проведены с использованием оборудования Центра диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и нанoeлектроники и Междисциплинарного ресурсного центра по направлению «Нанотехнологии» Научного парка СПбГУ, в рамках технического задания гранта РФФИ 16-03-00495а.

## Литература

1. Greiner N. R., Phillips D. S., Johnson J. D., Volk F. Diamonds in detonation soot // Nature. 1988. Vol. 333, iss. 6172. P. 440–442.
2. Shenderova O. A., Zhirnov V. V., Brenner D. W. Carbon nanostructures // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2002. Vol. 27, iss. 3. P. 227–356.
3. Ralchenko V. G. Nano- and microstructural features in CVD diamond growth // Nanostructured Carbon for Advanced Applications. 2001. P. 27–52.
4. Kidalov S. V., Shakhov F. M., Vul A. Y. Thermal conductivity of sintered nanodiamonds and microdiamonds // Diamond and Related Materials. 2008. Vol. 17, iss. 4–5. P. 844–847.



5. Han K. Y., Willig K. I., Rittweger E., Jelezko F., Eggeling C., Hell S. W. Three-dimensional stimulated emission depletion microscopy of nitrogen-vacancy centers in diamond using continuous-wave light // *Nano Lett.* 2009. Vol. 9, iss. 9. P. 3323–3329.
6. Tisler J., Balasubramanian G., Naydenov B., Kolesov R., Grotz B., Reuter R., Boudou J.-P., Curmi P. A., Sennour M., Thorel A., Borsch M., Aulenbacher K., Erdmann R., Hemmer P. R., Jelezko F., Wrachtrup J. R. Fluorescence and spin properties of defects in single digit nanodiamonds // *ACS Nano.* 2009. Vol. 3, iss. 7. P. 1959–1965.
7. Rabeau J. R., Chin Y. L., Prawer S., Jelezko F., Gaebel T., Wrachtrup J. Fabrication of single nickel-nitrogen defects in diamond by chemical vapor deposition // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86, iss. 13. P. 131926–131923.
8. Aleksenskii A. E., Osipov V. Y., Vul A. Y., Ber Y. B., Smirnov A. B., Melekhin V. G., Adriaenssens G. J., Iakobovskii K. Optical properties of nanodiamond layers // *Phys. Solid State.* 2001. Vol. 43, iss. 1. P. 145–150.
9. Glinka Y. D., Lin K.-W., Chang H.-C., Lin S. H. Multiphoton-excited luminescence from diamond nanoparticles // *J. Phys. Chem. (B).* 1999. Vol. 103, iss. 21. P. 4251–4263.
10. Klemeshev S. A., Petrov M. P., Trusov A. A., Vojtylov V. V. Light scattering in colloids of diamond and graphite // *Colloids and Surfaces (A).* 2012. Vol. 400. P. 52–57.
11. Burkhanov I. S., Krivokhizha S. V., Chaikov L. L. Stimulated concentration (diffusion) light scattering on nanoparticles in a liquid suspension // *Quantum Electronics.* 2016. Vol. 46, iss. 6. P. 548–554.
12. Klemeshev S. A., Petrov M. P., Rolich V. I., Trusov A. A., Vojtylov A. V., Vojtylov V. V. Static, dynamic and electric light scattering by aqueous colloids of diamond // *Diamond and Related Materials.* 2016. Vol. 69. P. 177–182.
13. Skorik Y. A., Petrova V. A., Okatova O. V., Strelina I. A., Gasilova E. R. Characterization of clusters and unimers in associating solutions of chitosan by dynamic and static light scattering // *Macromolec. Chem. Phys.* 2016. Vol. 217, iss. 14. P. 1636–1644.
14. Holt K. B. Diamond at the nanoscale: Applications of diamond nanoparticles from cellular biomarkers to quantum computing // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (A).* 2007. Vol. 365, iss. 1861. P. 2845–2861.
15. Dolmatov V. Y., Veretennikova M. V., Marchukov V. A., Sushchev V. G. Currently available methods of industrial nanodiamond synthesis // *Phys. Solid State.* 2004. Vol. 46, iss. 4. P. 611–615.
16. Djuricic A. B., Li E. H. Optical properties of graphite // *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 85, iss. 10. P. 7404–7410.
17. Вукс М. Ф. Электрические и оптические свойства молекул и конденсированных сред. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. 336 с.
18. Волькенштейн М. В. Молекулярная оптика. М.: Наука, 1951. 740 с.
19. Хюлт ван де Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 537 с.
20. Liu H., Ye J., Yang K., Xia M., Guo W., Li W. Real part of refractive index measurement approach for absorbing liquid // *Appl. Optics.* 2015. Vol. 54, iss. 19. P. 6046–6052.
21. Garcia-Valenzuela A., Barrera R. G., Sanchez-Perez C., Reyes-Coronado A., Mendez E. R. Coherent reflection of light from a turbid suspension of particles in an internal-reflection configuration: Theory versus experiment // *Optics express.* 2005. Vol. 13, iss. 18. P. 6723–6737.
22. Zilio S. C. A simple method to measure critical angles for high-sensitivity differential refractometry // *Optics express.* 2012. Vol. 20, iss. 2. P. 1862–1867.
23. Berne B. J., Pecora R. Dynamic light scattering with application to chemistry, biology and physics. New York: Dover Publication, 2000. 371 p.
24. Трусов А. А., Войтылов В. В. Электрооптика и кондуктометрия полидисперсных систем. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. 188 с.
25. Войтылов В. В., Петров М. П., Спартакос А. А., Трусов А. А. Влияние размеров частиц на оптические и электрооптические свойства коллоидов // *Опт. и спектр.* 2013. Т. 114, № 4. С. 687–695.
26. Zhivkov A. M., Hristov R. P. Stability of aqueous suspensions of alumina particles with adsorbed (carboxymethyl)cellulose // *Coll. Surf. (A).* 2017. Vol. 529. P. 523–530.
27. Zhivkov A. M., Hristov R. P. Adsorption of carboxymethyl cellulose on alumina particles // *J. Colloid Interface Sci.* 2015. Vol. 447. P. 159–166.
28. Zhivkov A. M., Hristov R. P. Electric polarizability dispersion of alumina particles with adsorbed carboxymethyl cellulose // *RSC Advances.* 2014. Vol. 4, iss. 6. P. 2715–2728.
29. Stagg B. J., Charalampopoulos T. T. Refractive indices of pyrolytic graphite, amorphous carbon, and flame soot in the temperature range 25 to 600°C // *Combustion and flame.* 1993. Vol. 94, iss. 4. P. 381–396.

## References

1. Greiner N. R., Phillips D. S., Johnson J. D., Volk F. Diamonds in detonation soot. *Nature*, 1988, vol. 333, iss. 6172, pp. 440–442.
2. Shenderova O. A., Zhirnov V. V., Brenner D. W. Carbon nanostructures. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2002, vol. 27, iss. 3, pp. 227–356.
3. Ralchenko V. G. Nano- and microstructural features in CVD diamond growth. *Nanostructured Carbon for Advanced Applications*, 2001, pp. 27–52.
4. Kidalov S. V., Shakhov F. M., Vul A. Y. Thermal conductivity of sintered nanodiamonds and microdiamonds. *Diamond and Related Materials*, 2008, vol. 17, iss. 4–5, pp. 844–847.
5. Han K. Y., Willig K. I., Rittweger E., Jelezko F., Eggeling C., Hell S. W. Three-dimensional stimulated emission depletion microscopy of nitrogen-vacancy centers in diamond using continuous-wave light. *Nano Lett.*, 2009, vol. 9, iss. 9, pp. 3323–3329.
6. Tisler J., Balasubramanian G., Naydenov B., Kolesov R., Grotz B., Reuter R., Boudou J.-P., Curmi P. A., Sennour M., Thorel A., Borsch M., Aulenbacher K., Erdmann R., Hemmer P. R., Jelezko F., Wrachtrup J. R. Fluorescence and spin properties of defects in single digit nanodiamonds. *ACS Nano*, 2009, vol. 3, iss. 7, pp. 1959–1965.
7. Rabeau J. R., Chin Y. L., Praver S., Jelezko F., Gaebel T., Wrachtrup J. Fabrication of single nickel-nitrogen defects in diamond by chemical vapor deposition. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, vol. 86, iss. 13, pp. 131926–131923.
8. Aleksenskii A. E., Osipov V. Y., Vul A. Y., Ber Y. B., Smirnov A. B., Melekhin V. G., Adriaenssens G. J., Iakoubovskii K. Optical properties of nanodiamond layers. *Phys. Solid State*, 2001, vol. 43, iss. 1, pp. 145–150.
9. Glinka Y. D., Lin K.-W., Chang H.-C., Lin S. H. Multiphoton-excited luminescence from diamond nanoparticles. *J. Phys. Chem. (B)*, 1999, vol. 103, iss. 21, pp. 4251–4263.
10. Klemeshev S. A., Petrov M. P., Trusov A. A., Voitylov V. V. Light scattering in colloids of diamond and graphite. *Colloids and Surfaces (A)*, 2012, vol. 400, pp. 52–57.
11. Burkhanov I. S., Krivokhizha S. V., Chaikov L. L. Stimulated concentration (diffusion) light scattering on nanoparticles in a liquid suspension. *Quantum Electronics*, 2016, vol. 46, iss. 6, pp. 548–554.
12. Klemeshev S. A., Petrov M. P., Rolich V. I., Trusov A. A., Voitylov A. V., Voitylov V. V. Static, dynamic and electric light scattering by aqueous colloids of diamond. *Diamond and Related Materials*, 2016, vol. 69, pp. 177–182.
13. Skorik Y. A., Petrova V. A., Okatova O. V., Strelina I. A., Gasilova E. R. Characterization of clusters and unimers in associating solutions of chitosan by dynamic and static light scattering. *Macromolec. Chem. Phys.*, 2016, vol. 217, iss. 14, pp. 1636–1644.
14. Holt K. B. Diamond at the nanoscale: Applications of diamond nanoparticles from cellular biomarkers to quantum computing. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (A)*, 2007, vol. 365, iss. 1861, pp. 2845–2861.
15. Dolmatov V. Y., Veretennikova M. V., Marchukov V. A., Sushchev V. G. Currently available methods of industrial nanodiamond synthesis. *Phys. Solid State*, 2004, vol. 46, iss. 4, pp. 611–615.
16. Djuricic A. B., Li E. H. Optical properties of graphite. *J. Appl. Phys.*, 1999, vol. 85, iss. 10, pp. 7404–7410.
17. Vuks M. F. *Elektricheskie i opticheskie svoystva molekul i kondensirovannykh sred* [Electric and optical properties of molecules and the condensed environments]. Leningrad, LGU Publ., 1984. 336 p. (In Russian)
18. Vol'kenshtein M. V. *Molekuliarnaia optika* [Molecular optics]. Moscow, Nauka Publ., 1951. 740 p. (In Russian)
19. Khiulst van de G. *Rasseianie sveta malymi chastitsami* [Light dispersion by small particles]. Moscow, Publishing house of foreign literature, 1961. 537 p. (In Russian)
20. Liu H., Ye J., Yang K., Xia M., Guo W., Li W. Real part of refractive index measurement approach for absorbing liquid. *Appl. Optics*, 2015, vol. 54, iss. 19, pp. 6046–6052.
21. Garcia-Valenzuela A., Barrera R. G., Sanchez-Perez C., Reyes-Coronado A., Mendez E. R. Coherent reflection of light from a turbid suspension of particles in an internal-reflection configuration: Theory versus experiment. *Optics express*, 2005, vol. 13, iss. 18, pp. 6723–6737.
22. Zilio S. C. A simple method to measure critical angles for high-sensitivity differential refractometry. *Optics express*, 2012, vol. 20, iss. 2, pp. 1862–1867.
23. Berne B. J., Pecora R. *Dynamic light scattering with application to chemistry, biology and physics*. New York, Dover Publication, 2000. 371 p.
24. Trusov A. A., Voitylov V. V. *Elektrooptika i konduktometriia polidispersnykh sistem* [Electrooptics and conductometry of polydisperse systems]. Leningrad, LGU Publ., 1989. 188 p. (In Russian)

25. Voitylov V. V., Petrov M. P., Spartakov A. A., Trusov A. A. Vliianie razmerov chastits na opticheskie i elektroopticheskie svoystva kolloidov [Influence of the sizes of particles on optical and electrooptical properties of colloids]. *Opt. i spektr. [Optics and Spectroscopy]*, 2013, vol. 114, no 4, pp. 687–695. (In Russian)
26. Zhivkov A. M., Hristov R. P. Stability of aqueous suspensions of alumina particles with adsorbed (carboxymethyl)cellulose. *Coll. Surf. (A)*, 2017, vol. 529, pp. 523–530.
27. Zhivkov A. M., Hristov R. P. Adsorption of carboxymethyl cellulose on alumina particles. *J. Colloid Interface Sci.*, 2015, vol. 447, pp. 159–166.
28. Zhivkov A. M., Hristov R. P. Electric polarizability dispersion of alumina particles with adsorbed carboxymethyl cellulose. *RSC Advances*, 2014, vol. 4, iss. 6, pp. 2715–2728.
29. Stagg B. J., Charalampopoulos T. T. Refractive indices of pyrolytic graphite, amorphous carbon, and flame soot in the temperature range 25 to 600°C. *Combustion and flame*, 1993, vol. 94, iss. 4, pp. 381–396.

Статья поступила в редакцию 15 октября 2017 г.

#### Контактная информация

*Везо Ольга Сергеевна* — магистр физики; e-mail: olgakuz-ko@mail.ru

*Войтылов Владислав Викторович* — доктор физико-математических наук, профессор;  
e-mail: v.voytylov@spbu.ru

*Петров Михаил Павлович* — кандидат физико-математических наук; e-mail: m.p.petrov@spbu.ru

*Трусов Анатолий Анатольевич* — доктор физико-математических наук, профессор;  
e-mail: a.trusov@spbu.ru

*Войтылов Алексей Владиславович* — кандидат физико-математических наук;

e-mail: a.voytylov@spbu.ru

*Vezo Olga Sergeevna* — Master of Physics; e-mail: olgakuz-ko@mail.ru

*Voytylov Vladislav Viktorovich* — Doctor of Physics and Mathematics, Professor;  
e-mail: v.voytylov@spbu.ru

*Petrov Mikhail Pavlovich* — PhD; e-mail: m.p.petrov@spbu.ru

*Trusov Anatoliy Anatol'evich* — Doctor of Physics and Mathematics, Professor;  
e-mail: a.trusov@spbu.ru

*Voitylov Alexey Vladislavovich* — PhD; e-mail: a.voytylov@spbu.ru