

## РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 535:778.38

**В.В. Демин, С.Г. Степанов**

### ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ МИКРОЧАСТИЦ

Проанализированы особенности голографической регистрации прозрачных микрочастиц. Изложен новый метод определения показателя преломления прозрачных микрочастиц. Разработана методика учета влияния кюветы с жидкостью на голографические изображения содержащихся в ней микрочастиц.

Интерес к оптическим методам регистрации прозрачных и полупрозрачных микрочастиц обусловлен, в основном, необходимостью исследования микроструктурных параметров гидрозолей в задачах оптики океана, лимнологии, в биологии и медицине (изучение планктона, физиологических гидрозолей и т.п.). В ряде публикаций [1, 2] отмечена возможность эффективного использования голографических методов для решения этих задач. При этом бесконтактность методов позволяет исследовать живые микрообъекты, например в пробе воды, не возмущая их. Не менее важна возможность определения формы микрочастиц по их голографическим изображениям, что позволяет не только обнаруживать, но и идентифицировать частицы, т.е. определять, например, принадлежность биологических микрообъектов к тому или иному типу организмов.

Конечно, задача исследования прозрачных микрочастиц возникает и в оптике аэрозолей, однако в большинстве случаев голографические изображения прозрачных и непрозрачных аэрозольных микрочастиц идентичны. В [3] приведены условия, при нарушении которых необходимо учитывать прозрачность микрообъектов в процессе регистрации, восстановления и интерпретации их изображений (условие дальней зоны и условие оптической мягкости микрочастицы). Отмечено, что такая необходимость может возникать при использовании схемы голографирования с переносом изображения (в том числе и при регистрации аэрозолей), а также в случае регистрации оптически мягких микрочастиц, т.е. микрочастиц, показатель преломления которых близок к показателю преломления окружающей среды. Последняя ситуация довольно часто реализуется при исследовании микрочастиц в жидких средах.

Известна возможность голографии непосредственно, без применения специальных фазоконтрастных методов, визуализировать фазовые микрообъекты (см., например, [4]). При голографической регистрации прозрачных и полупрозрачных микрочастиц наблюдается ряд особенностей голографических

изображений, таких как их оконтуренность, неоднородность по полю изображения и т.п., очевидно связанных с оптическими характеристиками регистрируемых микрообъектов. В данной работе представлен метод определения показателя преломления прозрачной микрочастицы по ее голографическому изображению. Экспериментальная апробация метода проведена как для частиц, находящихся в воздухе, так и для частиц, взвешенных в жидкости.

Во многих задачах объектом исследования является ансамбль микрочастиц, содержащийся в пробе, заключенной в кювету. В этих случаях, помимо оптических элементов схемы записи голограммы, в процессе формирования голографического изображения участвует и оптическая система границ раздела «жидкость – стенки кюветы – воздух». (Аналогичная ситуация будет возникать и при использовании погружной системы регистрации). В работе предлагается методика учета влияния этой дополнительной оптической системы.

#### Определение показателя преломления прозрачных микрочастиц

Как известно, за прозрачной (или полупрозрачной) частицей (1, рис. 1,а) распространяются две волны – дифрагировавшая (2) и преломленная (3). (Переотраженным на границах микрочастицы излучением при изложении метода можно пренебречь, в то же время, очевидно, его необходимо учитывать при интерпретации голографических изображений микрочастиц сложной формы). Преломленная волна фокусируется вблизи частицы и далее распространяется с гораздо большей расходимостью, чем дифрагировавшая волна. Поэтому при записи голограммы в дальней зоне частицы и наблюдении голографического изображения в микроскоп с ограниченной апертурой преломленным полем 3 можно пренебречь и считать, что регистрируется непрозрачная частица. Во многих экспериментах по регистрации аэрозолей это упрощение справедливо.

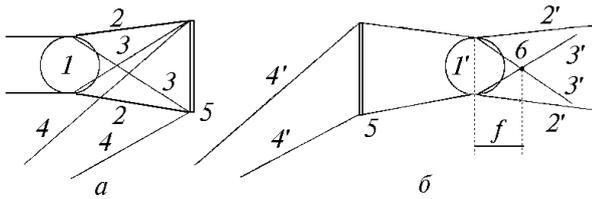


Рис. 1. Запись (а) и восстановление (б) голограммы прозрачной сферической частицы. 1 – микрочастица, 1' – ее голографическое изображение; 2 (2') – дифрагировавшая волна; 3 (3') – преломленная волна; 4 (4') – опорная (восстанавливающая) волна; 5 – голограмма; б – точка фокусировки преломленной волны;  $f$  – расстояние фокусировки

Если же микрочастица 1 (или ее изображение в схеме регистрации голограммы с переносом изображения) располагается вблизи плоскости записи голограммы 5, то в восстановленном изображении кроме частицы 1' (рис. 1, б) наблюдается еще и точка фокусировки преломленного излучения б. Этот же эффект может наблюдаться и для случая оптически мягкой частицы, когда ее показатель преломления близок к показателю преломления окружающей ее среды.

Расстояние  $f$  от центрального сечения частицы размера  $a$  до точки фокусировки преломленного излучения есть функция от показателей преломления частицы  $n$  и окружающей ее среды  $n_1$ :  $f = f(a, n, n_1)$ . Так, для сферической частицы эту связь легко получить из геометрического рассмотрения. Действительно, представив прозрачную микрочастицу в виде толстой линзы, можно получить следующее выражение:

$$f = an/[2(n - n_1)]. \quad (1)$$

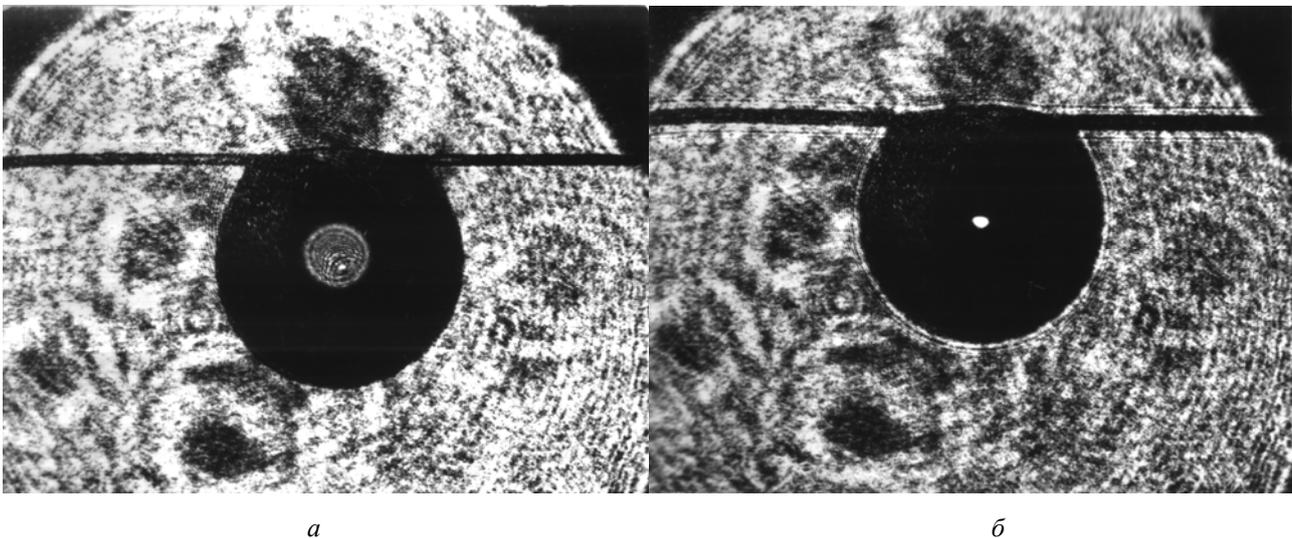


Рис. 2. Фотографии голографического изображения водной капли, расположенной в воздухе: а – микроскоп сфокусирован на центральное сечение капли; б – микроскоп сфокусирован на точку схождения преломленных лучей

### Голографическая регистрация микрочастицы внутри объема жидкости

Рассмотрим ситуацию, изображенную на рис. 3. Сферическая частица расположена в среде с показате-

Очевидно, что это выражение справедливо для параксиального фокуса, т.е. на таком расстоянии будут фокусироваться лучи, распространяющиеся вблизи оптической оси системы.

Тогда, измерив в голографическом изображении расстояние  $f$ , радиус частицы  $a$  и зная  $n_1$ , можно определить показатель преломления частицы  $n$ . Погрешность при этом определяется, в основном, точностью измерения величины перефокусировки увеличивающей оптической системы (например, измерительного микроскопа).

Для случая микрочастицы несферической формы вид функции  $f = f(a, n, n_1)$  в аналитическом виде получить, как правило, сложно. Поэтому для расчетов и интерпретации экспериментальных результатов необходимо использовать численные методы. Один из возможных алгоритмов расчета приведен в [3].

Эксперименты по голографической записи водных капель, зафиксированных на нити, подтвердили работоспособность метода. В эксперименте использовалась внеосевая схема регистрации голограмм, радиус капель составлял 100–200 мкм, в качестве источника излучения применялся непрерывный гелий-неоновый лазер. На рис. 2 приведены фотографии двух сечений объемного голографического изображения водной капли – плоскость центрального сечения капли и плоскость фокусировки преломленной волны. Аналогичные эксперименты проведены со сферическими частицами полистирола, взвешенными в глицерине. В обоих случаях погрешность определения показателя преломления составила 10 % и была обусловлена точностью измерения величины перефокусировки микроскопа.

лем преломления  $n_1$ , показатели преломления стенок кюветы и среды за пределами кюветы (среды расположения голограммы) –  $n_2$  и  $n_3$  соответственно. В этом случае объектом голографирования является не сама частица, расположенная в точке  $O$  (см. рис. 3), а ее

изображение, расположенное в точке  $O_1$ . Выясним, как связаны между собой расстояния  $OO_3$ ,  $O_1O_3$  и  $O_2O_3$ , поскольку, зная эти связи и имея возможность в эксперименте определить координату внешней стенки кюветы ( $O_3$ ), мы можем определить все вышеперечисленные расстояния.

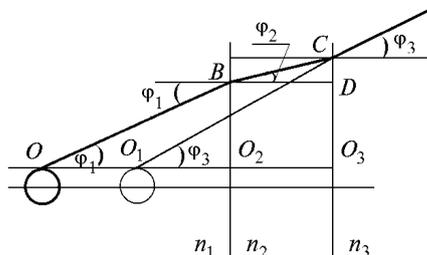


Рис. 3. К расчету положения частицы в кювете

Для этого рассмотрим произвольный луч  $OB$  в пределах угла дифракции  $\varphi_1$  на контуре частицы ( $\sin \varphi_1 = \lambda/d$ , где  $\lambda$  – длина волны освещающего излучения,  $d$  – диаметр частицы). Отметим, что разрешение голографии ограничено крупными частицами  $\lambda \ll d$ , т.е.  $\sin \varphi_1 \approx \text{tg } \varphi_1 \approx \varphi_1$ . Учитывая, что в большинстве случаев стенки кюветы выполнены из стекла, а средой, в которой расположена голограмма, является воздух, легко убедиться, что следствием малости угла  $\varphi_1$  является малость углов  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$ . Тогда для них выполняется такое же условие:  $\sin \varphi_2 \approx \text{tg } \varphi_2 \approx \varphi_2$  и  $\sin \varphi_3 \approx \text{tg } \varphi_3 \approx \varphi_3$ , а закон Снеллиуса – Декарта может быть записан в следующем виде:

$$n_1 \varphi_1 = n_2 \varphi_2 = n_3 \varphi_3. \quad (2)$$

Из геометрического рассмотрения рис. 3 можно записать:

$$CO_3 = O_1O_3 \text{ tg } \varphi_3 = O_1O_3 \cdot \varphi_3,$$

$$CO_3 = CD + DO_3 = BD \cdot \text{tg } \varphi_2 + BO_2 = O_2O_3 \cdot \varphi_2 + OO_2 \cdot \varphi_1$$

или, приравняв правые части,

$$O_2O_3 \varphi_2 + OO_2 \varphi_1 = O_1O_3 \varphi_3. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) можно записать требуемые связи:

$$OO_2 = O_1O_3 \frac{n_1}{n_3} - O_2O_3 \frac{n_1}{n_2}; \quad (4)$$

$$OO_3 = OO_2 + O_2O_3 = O_1O_3 \frac{n_1}{n_3} - O_2O_3 \left( \frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \quad (5)$$

и, наконец,

$$OO_1 = OO_3 - O_1O_3 = O_1O_3 \left( \frac{n_1}{n_3} - 1 \right) - O_2O_3 \left( \frac{n_1}{n_2} - 1 \right). \quad (6)$$

Таким образом, экспериментально измеряя в голографическом изображении расстояние  $O_1O_3$  от наблюдаемого изображения частицы до внешней стенки кюветы и зная толщину стенок кюветы  $O_2O_3$ , а также  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$ , можно определить положение реальной частицы относительно внешней стенки кюветы (расстояние  $OO_3$ ) и расстояние между реальной и наблюдаемой частицей  $OO_1$ .

Рассмотрим теперь ход преломленных лучей, интересующих нас с точки зрения определения  $n$  – показателя преломления вещества микрочастицы. Здесь наблюдается аналогичная ситуация (рис. 4), т.е. следует отличать точку  $F$  параксиального фокуса преломленных частицей лучей от ее наблюдаемого изображения  $F_1$ . Рассчитаем, как связаны между собой расстояния  $OF$  (эквивалентное  $f$  в формуле (1)) и измеряемое в эксперименте расстояние  $O_1F_1$ .

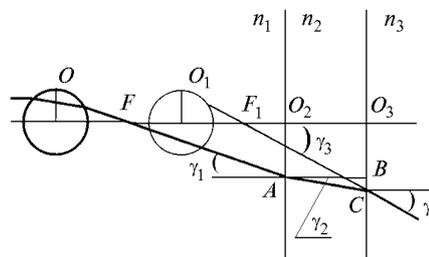


Рис. 4. К расчету положения точки фокусировки лучей, преломленных частицей, расположенной в кювете

Отметим, что рассматривается точка фокусировки лучей, распространяющихся вблизи оптической оси системы. Действительно, сферическая частица представляет собой толстую линзу с большой сферической аберрацией, поэтому для каждой пары точек на поверхности частицы, расположенных далеко от оптической оси, существует своя точка пересечения. Однако при наблюдении преломленного излучения в микроскоп с ограниченной числовой апертурой все лучи, распространяющиеся под большими углами, будут виньетироваться оправой микробъектива. (Этим и определяется темная кольцевая область в изображении частицы, см. рис. 2). Поэтому можно считать, что для углов  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$  (см. рис. 4) также выполняется условие  $\text{tg } \gamma = \sin \gamma = \gamma$ , и закон Снеллиуса, как и в предыдущем расчете, может быть записан в виде

$$n_1 \gamma_1 = n_2 \gamma_2 = n_3 \gamma_3. \quad (7)$$

Проведем геометрический расчет, аналогичный предыдущему:

$$O_3C = F_1O_3 \text{ tg } \gamma_3 = F_1O_3 \cdot \gamma_3,$$

$$O_3C = O_3B + BC = O_2A + BC = FO_2 \text{ tg } \gamma_1 + O_2O_3 \text{ tg } \gamma_2 = FO_2 \cdot \gamma_1 + O_2O_3 \cdot \gamma_2,$$

Отсюда

$$F_1O_3 \cdot \gamma_3 = FO_2 \cdot \gamma_1 + O_2O_3 \cdot \gamma_2. \quad (8)$$

С помощью (7) и (8) получим

$$FO_2 = F_1O_3 \frac{n_1}{n_3} - O_2O_3 \frac{n_1}{n_2} = (O_1O_3 - O_1F_1) \frac{n_1}{n_3} - O_2O_3 \frac{n_1}{n_2}. \quad (9)$$

Определив расстояние  $OF$ ,  $OF = OO_3 - FO_2 - O_2O_3$ , и используя (9) и (5), получим окончательное выражение

$$OF = O_1F_1 \frac{n_1}{n_3}. \quad (10)$$

Таким образом, выражение (10) описывает связь между искомым расстоянием  $OF$  от центрального сечения частицы до точки фокусировки преломленных лучей и измеряемым в эксперименте расстоянием  $O_1F_1$ .

### Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования проводились с использованием сферических полистирольных частиц радиусом от 200 до 800 мкм, зафиксированных на острие иглы. В эксперименте при помощи горизонтального микроскопа обеспечивалась возможность измерения расстояний  $OO_3$ ,  $OF$ ,  $O_1O_3$  и  $O_1F_1$  (см. рис. 3, 4), когда частица располагалась в воздухе, в пустой стеклянной кювете ( $n_2 = 1,52$ ), а также когда эта же частица (без смещения) находилась в кювете, заполненной глицерином ( $n_1 = 1,47$ ). Привязка микроскопа осуществлялась к внешней стенке кюветы. Кроме того, при помощи микрометрической подвижки обеспечивалось контролируемое перемещение частицы внутри кюветы.

Измерения проводились в следующем порядке. Частица, зафиксированная на игле, подвешивалась в

воздухе, и определялись продольные координаты точек  $O$  и  $F$ . Затем в схему вводилась пустая кювета (так, чтобы частица располагалась внутри кюветы), и, путем фокусировки горизонтального микроскопа последовательно на внешнюю стенку кюветы ( $O_3$ ), на точку  $F_1$  (наблюдаемого параксиального фокуса преломленных частицей лучей), и на изображение центрального сечения частицы ( $O_1$ ) (см. рис. 3, 4) измерялись расстояния  $O_1O_3$  и  $O_1F_1$ . После этого в кювету наливался глицерин и производились те же измерения. Во всех рассмотренных случаях осуществлялась регистрация голограммы частицы по внеосевой схеме и, после фотохимической обработки голограммы, измерялись эти же расстояния в голографических изображениях. Каждое измерение проводилось 10 раз с последующим усреднением. Кроме того, все перечисленные измерения производились и для случаев, когда частицу перемещали внутри кюветы на заданные расстояния (1, 2, 3, 5, 7, 11 мм) от ее начального положения.

Экспериментальные результаты сравнивались с результатами, рассчитанными по формулам (5), (6), а с использованием формул (1), (10) определялся  $n$  – показатель преломления частицы. Часть данных в качестве примера приведена в таблице.

Полученные экспериментальные данные удовлетворительно совпадают с расчетными, а их разброс позволяет оценить погрешность определения показателя преломления частиц – до 10%. Эта погрешность определялась, в основном, точностью измерения перефокусировки микроскопа (100 мкм) и субъективностью наводки микроскопа на резкость. Это особенно заметно при уменьшении размера частицы (см., например, данные для частицы 215 мкм). Исходя из этого, точность измерений может быть повышена путем использования прецизионного измерительного микроскопа и автоматизацией процесса обработки изображений.

Условия эксперимента	Смещение частицы, мм	$OO_1$ , мм	$O_1F_1$ , мм	$n$
$a = 658$ мкм, частица в пустой кювете (прямые измерения); $\langle O_1F_1 \rangle = 0,89 \pm 0,04$ , $\langle n \rangle = 1,59 \pm 0,04$ (без кюветы $\langle OF \rangle = 0,85 \pm 0,05$ , $\langle n \rangle = 1,63 \pm 0,06$ )	1	1,06±0,05	0,89±0,04	1,59±0,05
	2	1,04±0,05	0,90±0,01	1,58±0,01
	3	1,04±0,05	0,87±0,05	1,61±0,06
	4	1,00±0,07	0,93±0,05	1,55±0,04
	5	1,00±0,08	0,90±0,01	1,58±0,01
	6	1,00±0,08	0,90±0,01	1,58±0,01
$a = 658$ мкм, частица в кювете с глицерином (прямые измерения); $\langle O_1F_1 \rangle = 3,82 \pm 0,07$ , $\langle n \rangle = 1,61 \pm 0,01$ (без кюветы $\langle OF \rangle = 0,85 \pm 0,05$ , $\langle n \rangle = 1,63 \pm 0,06$ )	1	2,13±0,05	3,82±0,16	1,61±0,01
	2	2,40±0,02	3,70±0,08	1,61±0,01
	3	2,78±0,02	3,85±0,06	1,61±0,01
	4	3,08±0,04	3,75±0,08	1,61±0,01
	5	3,42±0,07	3,89±0,08	1,61±0,01
	6	3,75±0,05	3,85±0,11	1,61±0,01
$a = 783$ мкм, частица в кювете с глицерином (измерения с голограммы); $\langle O_1F_1 \rangle = 5,22 \pm 0,14$ , $\langle n \rangle = 1,59 \pm 0,01$ (без кюветы $\langle OF \rangle = 1,00 \pm 0,02$ , $\langle n \rangle = 1,64 \pm 0,02$ )	0	0,88±0,04	5,02±0,16	1,59±0,01
	3	1,76±0,09	5,35±0,13	1,59±0,01
	7	3,00±0,02	5,29±0,02	1,59±0,01
	11	3,66±0,05	5,23±0,17	1,59±0,01
$a = 215$ мкм, частица в кювете с глицерином (измерения с голограммы); $\langle O_1F_1 \rangle = 1,12 \pm 0,12$ , $\langle n \rangle = 1,62 \pm 0,02$ (без кюветы $\langle OF \rangle = 0,30 \pm 0,02$ , $\langle n \rangle = 1,56 \pm 0,02$ )	0	2,74±0,06	1,20±0,12	1,62±0,02
	3	3,78±0,05	1,09±0,08	1,63±0,01
	7	5,66±0,06	1,23±0,08	1,61±0,01

### Заключение

Проведенные исследования показали возможность определения показателя преломления микро-частиц дисперсной среды по ее голограмме. Погрешность экспериментальных данных (10 %) может быть уменьшена за счет повышения точности измерительного микроскопа и автоматизации процесса измерений.

Предложена и экспериментально апробирована методика учета влияния оптической системы границ раздела «жидкость – стенки кюветы – воздух». Методика повышает точность определения показателя преломления частиц среды для случая, когда объектом голографирования является жидкая дисперсная среда в кювете.

Томский государственный университет

Таким образом, показано, что голографические методы позволяют определять не только геометрические, но и оптические параметры микро-частиц дисперсных сред.

1. *Dyomin V.V., Sokolov V.V.* Holographic diagnostics of biological microparticles // SPIE Proceedings. 1996. V. 2678. P. 534–542.
2. *Dyomin V.V.* Development of methods for optical diagnostics of microstructure of water suspensions // SPIE Proceedings. 1996. V. 2678. P. 543–547.
3. *Демин В.В., Соколов В.В.* Голографическая регистрация оптически мягких микро-частиц. Метод расчета // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 8. С. 1218–1226.
4. *Cartwright S.L., Dunn P., Thompson B.J.* Particle sizing using far-field holography: new developments // Optical Engineering. 1980. V. 19. N 5. P. 727–733.

Поступила в редакцию  
11 декабря 1997 г.

*V.V. Dyomin, S.G. Stepanov.* **Holographic Investigation of Transparent Microparticles.**

Peculiarities of transparent microparticles holographing are analyzed. A new technique for measuring of refractive index of transparent microparticles is described. The technique is developed which takes into account the effect of glass cell with a liquid on a holographic image of the microparticles.