

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СВЕТА, РАССЕЯННОГО НА МИКРОЧАСТИЦЕ

М. В. Асташкин¹, В. К. Баранов¹, Д. Е. Гук², В. С. Ильин¹, В. А. Клевцов², С. А. Макаров²,
Е. Е. Мешков², С. Н. Степушкин¹, А. А. Сушко¹, В. Ю. Хатункин¹

¹РФЯЦ ВНИИЭФ

²СарФТИ НИЯУ МИФИ

Введение

При выходе ударной волны на свободную границу конденсированной среды вследствие проявления таких явлений, как откольное разрушение, развитие неустойчивостей на поверхности среды, кавитация, образуется облако летящих микрочастиц. Это явление было обнаружено во ВНИИЭФ в 50-х годах прошлого века Ф. Григорьевым и С. Б. Кормером (информация об этом открытии приведена в [1]). В 70-х годах 20-го века независимо от советских ученых это явление было обнаружено в США Эсеем [2]. Несмотря на длительную историю эти исследования ведутся по сей день как во ВНИИЭФ, так и за рубежом широким фронтом. Результаты исследований могут найти применение в метеорологии, биологии, фармакологии, экологии, астрофизике и пр.

В настоящее время для исследования состояния среды с взвешенными частицами широко используются оптические методы измерений. Суть этих методов состоит в том, что среда облучается лучом света и по характеристикам рассеянного излучения определяются параметры среды, такие как скорость движения частиц и их распределение по размерам. Параметры рассеянного излучения зависят от скорости движения частиц, их электромагнитных свойств, размеров, ориентации в пространстве (для несферических частиц), концентрации. При рассеянии электромагнитного излучения на частицах, в зависимости от угла рассеяния изменяется интенсивность света, его поляризация и длина волны (эффект Доплера для движущихся частиц). В настоящее время существует теория рассеяния только на сферических частицах – теория Ми [3]. Ниже на рис. 1 приведены расчетные

индикатрисы рассеяния света на сферических частицах различных размеров.

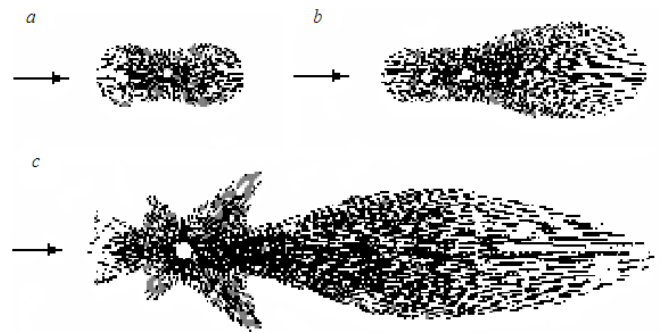


Рис. 1. Индикатрисы рассеяния света на сферических частицах различных размеров, где $a) a \sim \lambda/10$; $b) a \sim \lambda/4$; $c) a > \lambda$ (a – радиус частицы; λ – длина волны света)

Для частиц произвольной формы общей теории нет, поэтому исследование параметров рассеяния света на частицах произвольной формы является актуальной задачей.

Ниже описаны результаты разработки первого варианта установки, позволяющей проводить исследования параметров излучения, рассеянного на микрочастице произвольной формы и размером порядка и менее 100 мкм.

Техника экспериментов

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2,а. Фотография экспериментальной установки приведена на рис. 2,б.

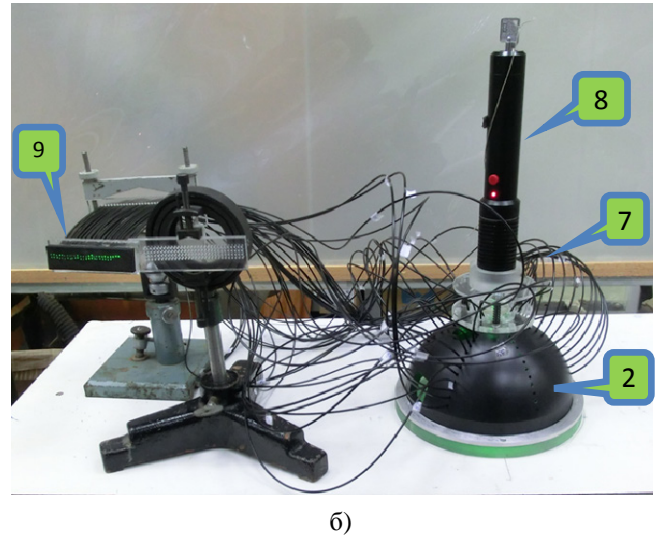
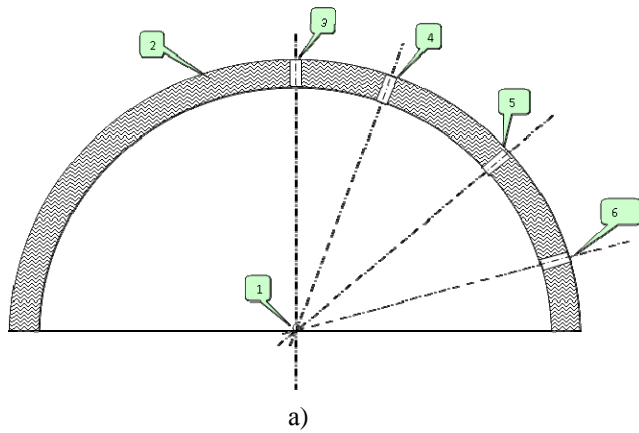


Рис. 2. а) Схема и б) фотография экспериментальной установки. Обозначения: 1 – исследуемая микрочастица; 2 – полусферический корпус с радиусом внутренней поверхности 85 мм; 3 – отверстие для источника зондирующего излучения; 4–6 – посадочные отверстия для световодов; 7 – световоды (приемники рассеянного излучения); 8 – лазерная указка (источник зондирующего излучения); 9 – приемная пластина с выходами торцами световодов, передающими информацию о величине рассеянного излучения

Микрочастица (1) помещается в корпусе (2), в центре его симметрии. Через радиальное отверстие (3) внутрь полусферы вводится зондирующее излучение, направленное на исследуемую микрочастицу (1). Рассеянное от микрочастицы излучение попадает на входные торцы световодов, установленных в посадочных отверстиях (4)–(6) корпуса (2). Выходные торцы световодов были сгруппированы по меридианам корпуса (2) и закреплены в приемной пластине (4), показанной на рис. 2.

Регистрация излучения, рассеянного от исследуемой микрочастицы осуществлялась путем фотографирования выходных торцов световодов на ПЗС матрицу фотоаппарата Nikon Coolpix 8800 с размером 3264×2448 пикселей. По интенсивности свечения выходных торцов световодов определялась величина рассеянного от микрочастицы излучения в направлениях, соответствующих местоположению на полусфере входных торцов световодов.

Источником зондирующего излучения была лазерная указка зеленого цвета с длиной волны $\lambda = 0,532$ мкм и мощностью 250 мВт.

Передача рассеянного от микрочастицы излучения на приемную планку (4), фотографируемую на ПЗС – матрицу, осуществлялась по полимерным световодам длиной 1 м с диаметром светопроводящей жилы 1 мм. Входные торцы и оси световодов были установлены радиально по направлению к центру корпуса (2) вдоль взаимно

перпендикулярных меридианов в диапазоне углов по широте от 20° до 80° и от 100° до 160° с шагом 5°.

Предварительно, перед сборкой стенда была измерена угловая индикатриса приемной чувствительности световодов, которая показана на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что индикатриса чувствительности световодов имеет вид остронаправленного лепестка с потерей ~20 % чувствительности при отклонении от оси световода на 5°. Эта осо-

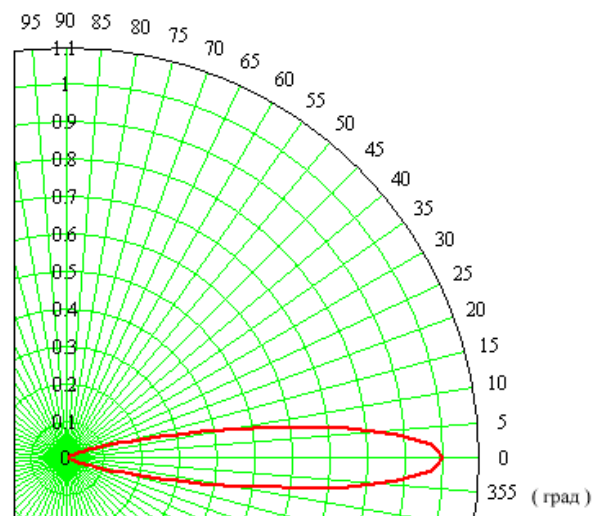


Рис. 3. Индикатриса приемной чувствительности световодов, установленных в полусферическом корпусе, для регистрации рассеянного от микрочастичек излучения

бенность световодов предъявляет достаточно высокие требования к точности радиальной установки световодов в полусферическом корпусе и к точности размещения исследуемых микрочастиц относительно центра полусферы. Для исключения влияния этой особенности световодов на точность измерения формы индикатрис светорассеяния угловая погрешность сверления посадочных отверстий световодов в корпусе полусферы должна быть не более $\pm 1^\circ$ относительно направления на центр полусферы и погрешность позиционирования исследуемой микрочастицы относительно центра полусферы не должна превышать $\pm 1,5$ мм.

Предварительно, перед установкой световодов в полусферический корпус, была проведена их калибровка по коэффициенту светопропускания. Разброс показаний коэффициента светопропускания составил от 85,0 % до 88,7 %.

Угловое распределение интенсивности обратно рассеянного излучения строилось путем программной оцифровки потенциалов пикселей ПЗС – матрицы с привязкой этих пикселей к угловым координатам входных торцов световодов.

Результаты экспериментов

Первый этап исследований взаимодействия зондирующего излучения с покоящейся микрочастицей включал в себя поиск и выбор исследуемых микрочастиц, с которыми в дальнейшем будут выполняться работы, а также выбор методов их подвеса в центре полусферического корпуса.

Эксперименты проводились со стеклянными шариками, взятыми из набора калиброванных микросфер из боросиликатного стекла «Soda Lime Glass». Плотность стекла составляла $\rho = 2,45$ г/см³ и коэффициент преломления $n = 1,52$ на длине волны 0,589 мкм. В наборе микросфер имеется 15 размеров с диаметрами от 1 мкм до 2 мм. Количество имеющихся микросфер допускает возможность проведения с ними газодинамических экспериментов. В первых экспериментах были исследованы стеклянные шарики с размерами: 750 мкм, 650 мкм и 550 мкм.

Первоначально позиционирование микрочастиц в центре полусферы производилось на жестких опорах: лавсановой пленке и стекле толщиной, соответственно, 3 и 250 мкм. Однако, в ходе экспериментов было выявлено, что от лавсана и стекла возникает сильное паразитное рассеяние, забивающее сигнал от исследуемых микросфер.

Во второй серии опытов микросферы подвешивались на торце кварцевого световода и цилиндрической поверхности волоса диаметрами, соот-

ветственно, 250 и 70 мкм. При этом волос находился под микросферой, облучаемой сверху. Наилучшие результаты измерений были получены при подвесе исследуемых микросфер на волосе. Они приведены на рис. 4–6, где сплошными линиями показаны экспериментально зарегистрированные графики, а пунктиром – линейно экстраполированные. Из полученных данных видно, что индикатрисы обратного светорассеяния имеют многолепестковый вид, примерно согласующийся с расчетным графиком рис. 1,с. Имеется угловая асимметрия, связанная, вероятно, с погрешностью позиционирования исследуемых микросфер, относительно центра измерительной полусферы.

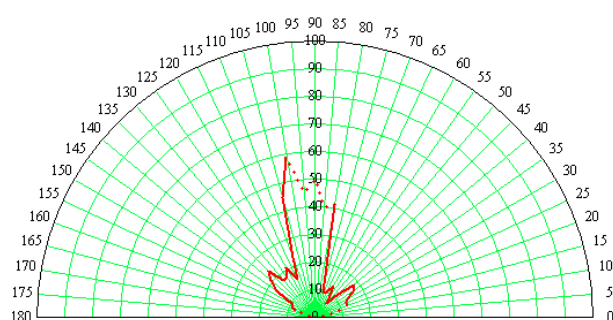


Рис. 4. Диаграмма обратного светорассеяния от микросферы $\varnothing 550$ мкм

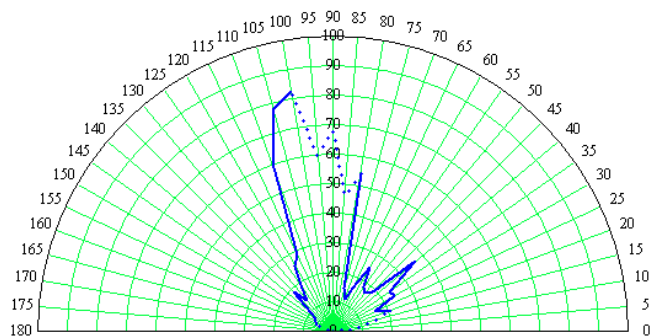


Рис. 5. Диаграмма обратного светорассеяния от микросферы $\varnothing 650$ мкм

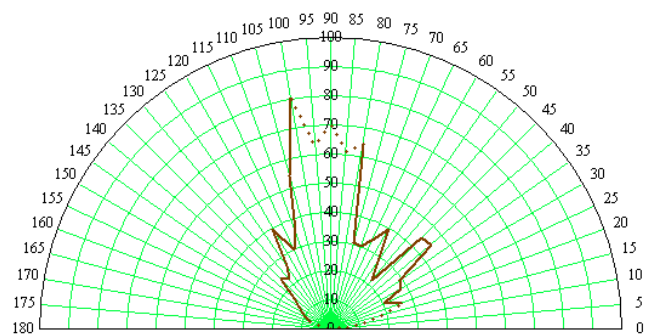


Рис. 6. Диаграмма обратного светорассеяния от микросферы $\varnothing 750$ мкм

Заключение

В результате проведенных исследований сделан первый шаг в разработке экспериментальной установки для исследования рассеяния света на частицах произвольной формы. Получены экспериментальные данные по рассеянию света на сферических микрочастицах примерно согласующиеся с теорией Ми [3]. Определены основные проблемы, и варианты их решения, для повышения качества экспериментальных данных и проведения дальнейших исследований в этом направлении.

В дальнейшей экспериментальной работе планируется:

- увеличить объем экспериментальных данных – увеличив размер полусферического корпуса и уменьшив величину шага измерений с 5° до 2° ;
- уменьшить погрешность позиционирования исследуемой микрочастицы – изменив способ подвеса микрочастицы на левитацию в воздушном потоке;

– с помощью «идеально» отражающего зеркала попытаться зарегистрировать индикатрисы светорассеяния, как в обратном, так и в прямом направлениях.

– экспериментально зарегистрированные значения обратного светорассеяния, сравнить с расчетными данными для соответствующих сферических частиц.

Список литературы

1. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на неё ударной волны и методах их диагностики // Физика горения и взрыва, 1998. Т. 34, № 6, с. 103–107.
2. Asay J. R. and Barker L. M. // J. Appl. Phys. 1974. 45, 2540.
3. Г. ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами. // М., 1961. С. 536.