

УДК 620.1.08.531.71:620.192.3

Устройство для измерения параметров сальтирующих песчинок

Лисютенко А.С.*, Мирсаитов С.Ф., Титов А.А.*****

Московский государственный университет приборостроения и информатики,

ул. Стромынка, 20, Москва, 107996, Россия

**e-mail: Lisyutenko_AS@mgupi.ru*

***e-mail: mgupipr5@mail.ru*

****e-mail: dor7338@mail.ru*

Аннотация

Предложено устройство для измерения параметров сальтирующих песчинок, использующее акустооптический модулятор для формирования измерения скорости и размера песчинок. Данное устройство представляет собой инновацию в области исследования экологических проблем, связанных с опустыниванием территорий. Уникальным это устройство делает использование акустооптического модулятора. В основе принципа работы этого устройства лежит метод расчета параметров песчинок, с помощью дифракционной картины, получаемой при прохождении излучения через АОМ. Устройство состоит из двух каналов, для каждого из которых были рассчитаны необходимые параметры, и выполнена точностная оценка работы устройства.

Ключевые слова: опустынивание, лазерный модуль, акустооптический модулятор, фотоприемник, объектив, частотомер, фазовый детектор, цифровой осциллограф.

Постановка задачи

В настоящее время для изучения процесса опустынивания территорий, в частности при исследовании экологической проблемы Аральского моря и проблемы берегов Балтийского моря, исследуют процесс сальтации песчинок, заключающийся в том, что под действием ветра происходит поднятие частиц песка. При этом возникает необходимость измерения размеров песчинок и построения их распределения по размерам [1].

Однако при этом не измеряется скорость движения сальтирующих песчинок, что очень важно для оценки времени опустынивания территории и разрушения привычного ландшафта. Метод измерения размеров и скорости движения аэрозольных частиц предложен в работе [2]. Если взять образец грунта с участка и проанализировать в лаборатории его распределение частиц по размерам, то затем различные лабораторные опыты будут давать разные результаты, потому что размеры веществ почв могут изменяться в зависимости от степени разрушающих сил, действующих на образец грунта. Например, распределение частиц по размерам, полученное с помощью просеивания и методом лазерной дифракции и последующим химическим рассеиванием будет сильно отличаться. Это означает, что распределение частиц по размерам относительно. Аналогичным образом, распределение по размерам взвешенных в воздухе частиц, которые испытывают влияние ветра при ветровой эрозии должно также зависеть от силы разрушающей силы, действующей на частицы аэрозоля, как они перемещаются вдоль поверхности.

Мы различаем четыре различных распределения частиц по размерам

- $p_s(d)$: распределение осажденных частиц по размерам: термин “осадок” здесь применим к частицам в воздухе близко к поверхности.

- $p_m(d)$: распределение минимально поврежденных частиц по размерам для исходной почвы; фраза “минимально поврежденный” означает предельный случай, в котором повреждение является настолько слабым, что распада вещества не возникает.

- $p_f(d)$: распределение разрушенных частиц по размерам для исходной почвы; термин “разрушен” означает предельный случай, в котором вещества повреждены настолько, насколько это возможно с помощью механических сил.

- $p_{fc}(d)$: распределение химически рассеянных частиц по размерам для исходной почвы; фраза “химически рассеянный” означает предельный случай, в котором вещества распадаются на составляющие их частицы своих размеров.

$p_m(d)$, $p_f(d)$ и $p_{fc}(d)$ - идеализированные распределения частиц по размерам, которые специфичны для разных почв и независимы от интенсивности ветровой эрозии.

Теперь величина эмиссии пыли может быть оценен путем использования распределения для разрушенных частиц. Предположим, что максимальный размер частиц пыли является d_d , тогда массовая доля пыли, η_f , может быть определена как:

$$\eta_f = \int_0^{d_d} p_f(d) \delta d \quad (1)$$

Если общая сумма поврежденных почв в случае ветровой эрозии обозначается M , тогда максимальное количество эмиссии пыли будет $\eta_f M$. Это определение будет использоваться в схеме эмиссии пыли, описанной далее.

На практике, p_m и p_f имеют приблизительные значения. Мы допускаем, что p_m получают, используя приемы, которые вызывают минимально возможные для образца почвы механические повреждения, а p_f получают, используя приемы, которые вызывают наиболее возможные для образца почвы механические повреждения. Для оценки массового процентного содержания PM_{10} (твердые частицы с диаметром менее 10 мкм) для взвеси почвы, адаптирована операция простого единичного ресуспензирования при разнесении ветром. Этот метод измеряет количество пыли, которое свободно присутствует в образце грунта. Слово "свободный" употребляется здесь в том смысле, что частицы пыли могут легко переноситься ветром. Был разработан прибор, в котором соединяется устройство для подачи абразива с устройством отслеживания частиц для измерения величины эмиссии PM_{10} и $PM_{2.5}$ (частиц с диаметром менее 2.5 мкм) с почвы. Их измерения подтверждают, что в почве часть пыли находится в свободном состоянии (доля разносимого ветром ветра) и часть пыли собрана вместе. Соотношение общей пыли, которое может перейти в свободное состояние путем механического трения (фракция абразива) в то время как остальные могут перейти в свободное состояние только с помощью химического диспергирования (дисперсной фракции). Представляется разумным предположить, что существуют три типа связывающей энергии, а именно, ψ_m , ψ_f и ψ_{cf} , представляющих, соответственно, типы энергии для

свободного пыли, механически-дисперсной пыли и химически-дисперсной пыли. На практике, p_m может быть аппроксимирована с помощью распределения частиц по размерам вычисленного с помощью операции разнесения ветром, а p_f может быть аппроксимирована с помощью распределения частиц по размерам вычисленного с помощью методики самостирания. Следует заметить, что при ветровой эрозии почвы, частицы почвы не подвергаются химической дисперсии [7].

Как показали проведенные исследования, предложенный метод можно использовать и для измерения параметров частиц с размером свыше 50 мкм, модернизировав оптическую схему устройства [2].

Для измерения размеров и скорости более крупных песчинок в статье предлагается устройство, схема которого приведена на рисунке 1.

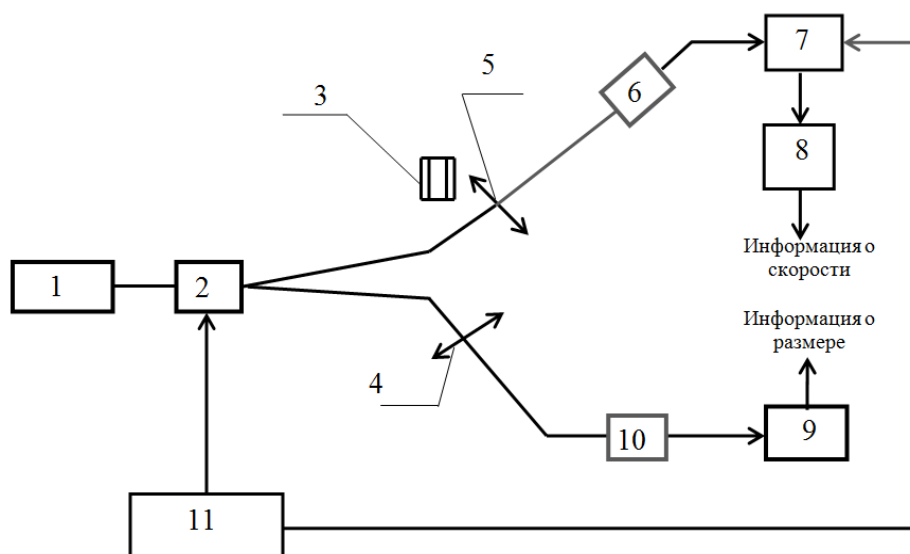


Рисунок 1 - Функциональная схема устройства для измерения параметров
сальтирующих песчинок

Описание устройства измерения

Лазерный модуль (1) освещает расширенным пучком акустооптический модулятор (АОМ) (2), на который из блока управления(11) подаются напряжения двух близко расположенных частот, что позволяет сформировать в дифрагированном пучке интерференционную картину[3]. На выходе АОМ выделяются пучки первого и нулевого порядков. С помощью трубки (3) песчинки вводятся в измерительный объем. При пролете песчинками двух пучков свет на них рассеивается и поступает в два измерительных канала. Первый канал образован объективом (5), фотоприемным модулем(6), фазовым детектором (7), частотомером (8) и блоком управления (11), а второй канал-объективом(4), фотоприемным модулем(10) и цифровым осциллографом(9).

Указанные два канала измерений обеспечивают получение информации о скорости (первый канал) и размерах (второй канал) исследуемых частиц.

В первом канале при пролете песчинкой интерференционной картины у рассеянного на ней света будет наблюдаться доплеровский сдвиг частоты, пропорциональный скорости пролета песчинкой измерительного объема. Для его выделения рассеянный свет собирается объективом (5) и направляется на фотоприемный модуль(6), сигнал с которого поступает на первый вход фазового детектора (7),а на второй его вход подается опорный сигнал с блока управления(11).Частота этого сигнала соответствует низкой частоте сигнала, подаваемого на АОМ (2). Фазовый детектор (7) выделяет сигнал с частотой доплеровского сдвига, которая измеряется частотомером (8) и величина которой

пропорциональна скорости пролета сальтирующей песчинкой измерительного объема.

Второй измерительный канал по амплитуде и форме импульсного сигнала с выходы фотоприемного модуля (10) позволяет оценить размеры сальтирующей песчинки [2-4].

Принцип действия АОМ основан на дифракции света на бегущей ультразвуковой волне в оптическипрозрачном материале (стекле). Бегущую ультразвуковую волну создает пьезоэлектрический преобразователь, присоединённый к стеклянной пластине. Благодаря возникновению участков сжатия и растяжения, возникающих в стекле и различающихся показателем преломления, в среде формируется дифракционная решётка. Световой пучок, дифрагируя на решётке, образует несколько выходных пучков (дифракционных порядков), разнесённых в пространстве под равными углами относительно друг друга. В качестве источника излучения используется малогабаритный лазерный модуль, исходя из размеров измеряемых частиц, обеспечивающий монохроматический параллельный пучок излучения.

Расчет основных параметров схемы устройства измерения

С целью увеличения мобильности проектируемого устройства, для уменьшения его габаритов выбран миниатюрный лазерный модуль мощностью 0,015Вт, с длиной волны излучения 532 нм и диаметром пучка 8мм. В качестве материала АОМ в рамках задачи расчета параметров выбран молибдат свинца,

скорость звука в котором составляет 3750 м/с. Размер сальтирующих песчинок колеблется обычно в диапазоне 20-200мкм, а максимальная скорость может достигать 10м/с [1]. Используя эти данные, можно определить основные характеристики устройства измерения параметров сальтирующих песчинок

Для определения параметров фотоприемного модуля (6) необходимо определить мощность излучения, падающую на него, а также найти частоту сигнала, пришедшего на фотоприемник, после прохождения рассеивающего объема. Используя результаты работ [4,5], получим следующее выражение для мощности сигнала на фотоприемном модуле (6):

$$P_6 = \frac{PS_n M h \sin^2(\varphi) \cos \alpha}{S_n}, \quad (2)$$

где P_6 -мощность излучения лазерного модуля;

S_n -площадь пучка лазера в месте пролета песчинок;

S_s -площадь песчинки;

φ -апертурный угол объектива 5;

α -угол между нормалью к песчинке и направлением на объектив 5;

ρ -коэффициент отражения песчинки;

τ -потери в оптике и АОМ;

M -коэффициент модуляции АОМ, зависящий от периода

интерференционной картины и размера частицы;

h -дифракционная эффективность АОМ.

Коэффициент модуляции АОМ равен 0,8 при соблюдении соотношения[6]:

$$\frac{a}{\Lambda} = 0,4; \quad (3)$$

где, a -диаметр песчинки;

Λ -период интерференционной картины.

При максимальном размере песчинки 200мкм из выражения (3) следует, что период интерференционной картины $\Lambda = 0,5$ мм. Используя работу [3] и указанные выше параметры АОМ (2), найдем управляющую частоту сигнала, подаваемого блоком управления на АОМ (11):

$$f_{\text{уп}} = \frac{V_{\text{зв}}}{\Lambda} = 7,5 \quad , \quad (4)$$

где $V_{\text{зв}}$ - скорость звука в материале АОМ.

Доплеровский сдвиг частоты - обусловлен падением оптического луча на движущийся акустический волновой фронт и используется в лазерной локации и интерферометрии. Доплеровский сдвиг частоты находится в соответствии с выражением (4):

$$f_{\text{д}} = \frac{V_{\text{п}}}{\Lambda} = 20 \quad , \quad (5)$$

где $V_{\text{п}}$ -скорость движения песчинки.

Для расчета мощности остальных параметров, входящих в выражение (2), необходимо задаться и другими, входящими в эту формулу параметрами. В рамках этого расчета возьмем минимальный размер песчинки 20 мкм, диаметр пучка лазерного модуля 8мм. Остальные параметры выберем согласно работам [2-4] равными соответственно: $\sin \varphi = 0,4$; $\tau = 0,5$; $\rho = 0,2$; $\cos 45^\circ = 0,7$. Эти параметры позволяют максимально точно определить мощность сигнала, приходящего на

фотоприемный модуль, после прохождения рассеивающего объема. Для получения в дифрагированном пучке максимальной мощности, необходимо установить АОМ в режим дифракции Брэгга, что позволит обеспечить дифракционную эффективность АОМ на уровне $h=0,9$. Подставляя эти значения в выражение (2) получим: $P_6 = 7,2 \cdot 10^{-10}$ Вт. В качестве фотоприемного модуля выбирается фотоэлектронный умножитель со встроенным усилителем, имеющий пороговую чувствительность порядка $W=10^{-14}$ Вт/Гц^{0,5}. Диапазон частот, воспроизводимых фотоприемным модулем(6), с учетом (3) и (4) будет равен:

$$\Delta f_{\text{МФУ}} f_0 = 7,52 \quad (6)$$

Тогда минимально обнаруживаемую фотоприемным модулем(6) мощность можно найти по известному выражению[3]:

$$P_{\text{min}} \Delta f^{0,5} * W = 2.74 * 10^{-11} \quad (7)$$

Отношение сигнал-шум с учетом (2) и (7) будет равно:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_6}{P_{\text{min}6}} = 26.37 \quad (8)$$

Такая величина отношения сигнал-шум достаточна для надежного воспроизведения информации.

Для оценки возможностей второго канала необходимо определить рассеиваемую на песчинке мощность сигнала, поступающего на фотоприемный модуль(10). При этом можно использовать выражение (2), и учесть, что в пучке нулевого порядка нет интерференционной картины, и поэтому можно принять $M=1$.

Пучком нулевого порядка считается недифрагированный пучок, т.е. не изменивший своего направления распространения по отношению к падающему пучку света. С учетом этого получим следующее выражение для рассеиваемой мощности сигнала, поступающего на фотоприемный модуль(10):

$$P_{10} = \frac{PS_n \rho \tau (1-h) \sin^2(\varphi) \cos \alpha}{S_n} \quad (9)$$

Подставляя в выражение (9) указанные выше значения параметров, получим $P_{10} = 9 \cdot 10^{-11}$ Вт. Для определения полосы частот сигнала необходимо найти длительность импульса при пролете песчинок через пучок. При скорости пролета 10 м/с и диаметре пучка лазера 8 мм, длительность импульса составит $8 \cdot 10^{-4}$ с. Полоса частот такого сигнала будет равна 1,25 кГц. Тогда выражение (7) дает следующую оценку для рассеиваемой мощности $P_{\min 10} = 3,55 \cdot 10^{-13}$ Вт. По выражению (8) определяется отношение сигнал-шум, которое будет равно 253,5.

Оценка точности измерений

Проведенные вычисления позволяют оценить точность измерения скорости, которая будет соответствовать оценке, сделанной в работе [2] и составит около 5% от измеряемой величины, что является приемлемым значением для выполнения поставленной задачи.

Для оценки точности измерения размера песчинки можно воспользоваться выражением (9). Будем считать, что песчинки имеют сферическую форму. Тогда из

выражения (9) с учетом коэффициента передачи фотоприемного модуля R можно получить следующее выражение для диаметра песчинки:

$$d = \sqrt{\frac{UD_{\lambda}}{P_{10}R\rho\tau(1-h)\sin^2(\varphi)\cos\alpha}}, \quad (10)$$

где:

U -напряжение на выходе фотоприемного модуля;

D_{λ} -диаметр пучка лазера.

Выделим в этом выражении параметры, имеющие систематические ошибки. К таким параметрам относятся $\varphi, \alpha, \tau, D_{\lambda}, \rho$, которые должны быть определены перед началом измерений. Тогда применяя к выражению (10) метод варьирования по параметрам, найдем относительную ошибку измерения размера песчинок:

$$\frac{\Delta d}{d} = \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2}. \quad (10)$$

В работе [2] показано, что указанные в выражении (10) относительные погрешности определения параметров R, U, P примерно равны 1%. С учетом этих оценок получим, что относительная ошибка измерения размера песчинок составит: $\frac{\Delta d}{d} = 0,86\%$.

Заключение

Проведенные в статье расчеты показали, что использование сформированных акустооптическим модулятором двух излучаемых пучков света позволяет измерять размер и скорость более крупных, чем допускалось ранее, сальтирующих песчинок и тем самым расширить диапазон измерений размера и скорости частиц. Расширение диапазона измерений дает возможность проводить более информативные и глубокие эксперименты по составу песка, что в дальнейшем позволяет надеяться на существенные продвижения в решении глобальных экологических проблем, связанных с обмелением Аральского моря и с проблемами берегов Балтики.

Библиографический список:

1. Титов А.А., Горчаков Г.И., Бунтов Д.В. Параметры нижнего слоя сальтации на опустыненной территории // Доклады Академии Наук. Геофизика. 2009. том 424. №1. С. 102-106.
2. Титов А.А., Мирсайтов С.Ф. Измерение размеров и скорости частиц аэрозоля // Метрология. 2013. №1. С. 18-23.
3. Титов А.А., Амурский В.В., Гарипов В.К.. Методы построения и расчета лазерных измерительных и запоминающих устройств. – М: Машиностроение, 2008. - 134 с.
4. Титов А.А. Гетеродинный измеритель скорости и направления падения дождевых капель // Измерительная техника. №11. 2008. С. 43-45.
5. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. – М: Машиностроение, 1992. - 447 с.

6. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичус Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. - Москва, Наука, 1982. - 304 с.

7. Dr. Yaping Shao, Physics and Modelling of Wind Erosion, Springer Science + Business Media B.V., 2008, 459 p.