

07;12

Влияние шумов и вибраций оборудования на работу лазерного измерителя концентрации частиц и оптимизация его параметров

© В.Е. Привалов, А.В. Рыбалко, П.В. Чартий, В.Г. Шеманин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vep@peterlink.ru

(Поступило в Редакцию 17 февраля 2006 г. В окончательной редакции 13 июня 2006 г.)

Паразитные подсветки, проникающие в газоход, снижают эффективность работы лазерного измерителя концентрации твердых частиц (ЛИКТЧ) в аэродисперсных потоках. Шум и вибрация стенок газохода, обусловленные шумом и вибрациями побудителя потока, и других источников, механически сопряженных с газоходом, модулируют паразитное излучение, и оно может формировать сигнал, воспринимаемый фотоприемником измерителя как полезный. Проведен анализ формирования паразитной засветки, модулированной шумами и вибрациями стенок газохода, и ее оптико-электрического преобразования с учетом спектральной характеристики и схемы включения фотоприемника ЛИКТЧ. Оценен вклад паразитной засветки на основе изучения амплитудных и частотных характеристик реальных источников шумов и вибраций, приводящих к вибрациям стенок газоходов, на которых устанавливается ЛИКТЧ. Предложены параметры работы ЛИКТЧ с двойной амплитудной модуляцией и последующим двойным синхронным детектированием, позволяющие существенно повысить помехозащищенность измерителя.

PACS: 42.62.-b

Одним из оптимальных автоматических средств измерения является лазерный измеритель концентрации твердых частиц (ЛИКТЧ) в аэродисперсном потоке, построенный на основе метода интегрального светорассеяния (МИСР) [1,2]. Правильный выбор оптической и электрической схемы, учет условий эксплуатации во многом определяют его технические и экономические показатели.

Проведение полномасштабных экспериментальных исследований реальных аэродисперсных потоков оптическими методами по объективным причинам является сложной задачей. По результатам численного моделирования возможна разработка специального стендового оборудования для создания модельных аэродисперсных потоков в лабораторных условиях, с основными характеристиками (геометрические размеры, скорость потока, концентрация и распределение частиц по размерам), адекватными реальным потокам [3]. Описание схемы одного из вариантов такого стенда (рис. 1) дано в [1,3].

Схема экспериментальной установки для проведения исследований аэродисперсных потоков с помощью измерителя, построенного на основе МИСР (рис. 2), была подробно описана в [4].

При проведении исследований как модельных, так и реальных аэродисперсных потоков с помощью измерителя был обнаружен высокий уровень вибраций стенок газоходов с потоком, на которых установлены излучатель и фотоприемник измерителя. Эти вибрации обусловлены шумами и вибрациями побудителя потока и другого механически сопряженного с газоходами оборудования [1,5].

Внутри газоходов, на стенках которых установлен измеритель, возможны паразитные подсветки за счет электрических разрядов наэлектризованного аэрозоля и

за счет постороннего света, проникающего внутрь газохода через открытые штуцеры, через устье источника выбросов и попадающего в поле зрения фотоприемника (рис. 2).

В настоящей работе сделано предположение о существенности влияния на эффективность ЛИКТЧ засветки, которая может попасть в поле зрения фотоприемника, и вибраций стенок газохода, обусловленных шумами и вибрациями механически сопряженного с газоходом

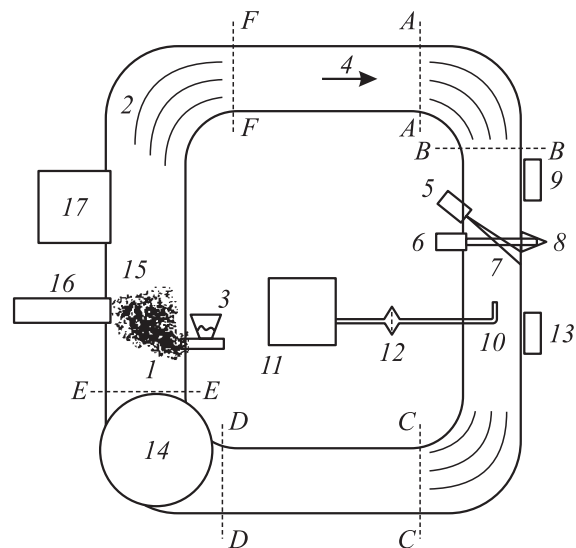


Рис. 1. Схема стенда для моделирования аэродисперсных потоков. 1 — аэрозольные частицы; 2 — направляющие лопатки; 3 — генератор аэрозольных частиц; 4 — направление движения пыли; 5–13 — средства измерения параметров аэродисперсных потоков; 14 — вентилятор; 15 — газоход; 16 — байпасный отвод; 17 — электродвигатель.

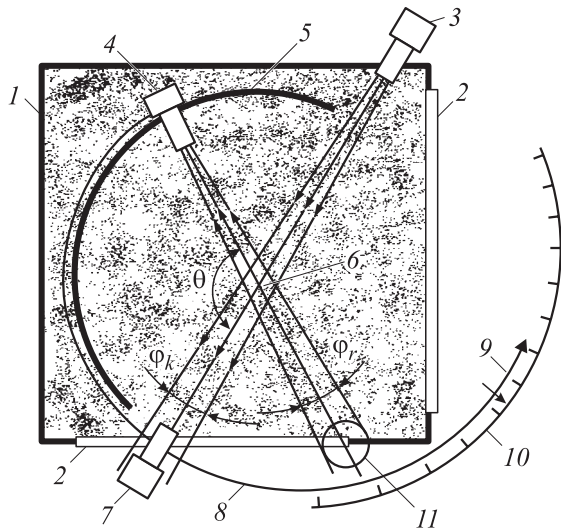


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для проведения исследований аэродисперсных потоков с помощью измерителя: 1 — газоход; 2 — оптические окна; 3 — излучатель; 4 — фотоприемник рассеянного света (ФПР); 5 — направляющая ФПР; 6 — измерительный объем ФПР; 7 — фотоприемник прошедшего света; 8 — тяга для перемещения ФПР; 9 — указатель положения ФПР; 10 — шкала положения ФПР; 11 — поле зрения ФПР.

оборудования. Для оценки этого влияния на полезный сигнал необходимо на основе анализа формирования паразитных засветок и их модуляции шумами и вибрациями стенок газохода выполнить их численное моделирование и оценить вклады для конкретных амплитудных и частотных характеристик реальных источников шумов и вибраций.

Рассмотрим следующую ситуацию (рис. 3): в поле зрения фотоприемника 1 попадает дневной свет и часть противоположной стенки газохода 3 (заштрихована).

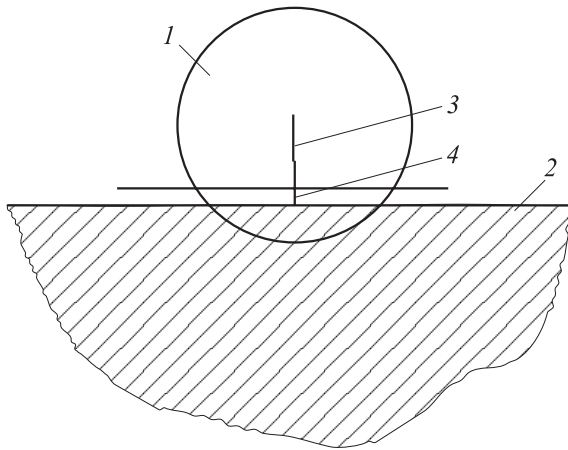


Рис. 3. Картинка в поле зрения фотоприемника: 1 — поле зрения фотоприемника; 2 — стенка газохода; 3 — расстояние „ x “ от центра до стенки газохода; 4 — амплитуда колебаний „ Δx “ пятна.

Вариации монохроматического светового потока $\Delta\Phi$ на входном окне фотоприемника можно представить, как обычно, в виде произведения спектральной яркости излучателя $L(\lambda)$ (считая в пределах площадки излучателя ее значение постоянным), телесного угла сбора излучения $\pi(a_1/h)^2$ и переменной площадки источника $2a_2\Delta x$, связанной с перемещениями границы светящейся области Δx вследствие вибраций

$$\Delta\Phi = L(\lambda)\pi(a_1/h)^2 2a_2\Delta x, \quad (1)$$

где a_1 и a_2 — радиусы оптического окна фотоприемника и пятна, попадающего в его поле зрения соответственно.

В качестве приемника излучения в ЛИКТЧ был взят кремниевый фотодиод, включенный в диодной схеме с симметричным нагрузочным сопротивлением R_1 , равным $320(160 \times 2) \text{ k}\Omega$ и предварительным дифференциальным усилителем с коэффициентом усиления по напряжению около 80. Измеритель с данным фотоприемником и схемой его включения был применен для определения концентрации цементных частиц в аэродисперсном потоке. При этом предельно допустимому уровню цементного аэрозоля 0.5 mg/m^3 соответствовал уровень выходного сигнала фотодиода около $1 \mu\text{V}$ [1].

Флуктуационная составляющая напряжения ΔV_1 на выходе фотодиода, обусловленная вибрациями оборудования, с учетом спектральной зависимости его токовой чувствительности S_1 , спектральной яркости паразитной засветки s_b и значения нагрузочного сопротивления R_1 , с учетом выражения (1) примет вид

$$\Delta V_n = \pi(a_1/h)^2 2a_2\Delta x R_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_1(\lambda) s_b(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 — пределы интегрирования, определяемые граничными длинами волн подынтегральных спектральных зависимостей.

В реальных ситуациях входящие в выражение (2) спектральные характеристики, как правило, аналитически не определяются, а задаются таблично или графически. Поэтому, заменяя в (2) интегрирование суммированием, разбив условно диапазон интегрирования от начальной до конечной длины волны λ_1 до λ_2 , получим:

$$\Delta V_n = \pi(a_1/h)^2 2a_2\Delta x R_1 \sum_{i=1}^n S_1(\lambda_{m,i}) s_b(\lambda_{m,i}) (\lambda_{i+1} - \lambda_i), \quad (3)$$

где n — количество условных диапазонов, $\lambda_{m,i} = \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2}$ — средняя длина волны i -го поддиапазона, λ_i, λ_{i+1} — начальное и конечное значения длин волн i -го поддиапазона.

Для получения с помощью зависимости (3) численных оценок паразитного сигнала уточним значения входящих в него величин.

В рассматриваемом измерителе оптимальный размер радиуса оптического окна фотоприемника составил около 15 mm , а угол расхождения поля зрения фотоприемника — $1-2^\circ$. Расстояние h от фотоприемника до пятна,

Таблица 1.

Характеристика	Номер поддиапазона i		
	1	2	3
$\lambda_i, \mu\text{m}$	0.4	0.6	0.95
$\lambda_{i+1}, \mu\text{m}$	0.6	0.95	1.1
$\lambda_{m,i}, \mu\text{m}$	0.5	0.775	1.025
$S_I(\lambda_{m,i}), \text{A/Wt}$	0.2	0.35	0.2
$S_b(\lambda_{m,i}), \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	50	10	1

попадающего в его поле зрения, составляло около 1 м, при этом радиус пятна ~ 50 мм.

Типичная кривая спектральной яркости безоблачного неба, обусловленной диффузной составляющей солнечной радиации, на уровне моря для зенитного угла 45° при отличной видимости представлена в [6]. Вид спектральной чувствительности кремниевого фотодиода представлен в [7]. Для фотодиодного включения [7] разобьем условно диапазон от начальной до конечной длины волны на 3 поддиапазона в той части спектра, где работает кремниевый фотодиод (0.4–1.1 μm). Тогда определяются значения спектральных характеристик, представленные в табл. 1.

Оценим значение амплитуды колебаний Δx поверхности механически сопряженного с газоходом оборудования, предположив, что вблизи него (на расстоянии 1 м) частоты и амплитуды его колебаний и колебаний воздуха одинаковы. В практических задачах целесообразно проводить экспериментальные исследования амплитудно-спектральных характеристик вибраций технологического оборудования и газоходов в каждом конкретном случае и брать в расчет фактические значения параметров колебаний, однако при этом ход рассуждений не меняется.

Из соотношений, описывающих звуковые явления в газах и представленных в [8], найдем связь амплитуды колебаний воздуха с амплитудой звукового давления Δp_m :

$$\Delta x = \frac{\Delta p_m}{\rho \omega v},$$

где ρ — плотность невозмущенного газа, ω — циклическая частота колебаний, v — фазовая скорость (скорость звука в воздухе).

Звуковое давление L_p , измеряемое в дВ, связано с амплитудой давления соотношением [8]:

$$L_p = 20 \lg \left(\frac{\Delta p_m}{\Delta p_0} \right),$$

где $\Delta p_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ Па — пороговое давление звука [8], тогда амплитуда перемещения

$$\Delta x = \frac{\Delta p_0 10^{\frac{L_p}{20}}}{\rho \omega v}. \quad (4)$$

Для подтверждения значимости представленных выше рассуждений оценим вклад паразитной засветки, моду-

лированной шумами и вибрациями реального технологического оборудования, механически сопряженного с газоходом, на примере цементной промышленности. Известно, в цементной промышленности аэродисперсные потоки находят весьма широкое применение. Поэтому рассмотрим амплитудные и частотные характеристики шумов, создаваемых вибрациями основного технологического оборудования, к которому относятся цементные мельницы, вращающиеся печи и клинкерные холодильники цементных заводов. В [9] представлены амплитуды звукового давления от шумов, создаваемых вибрациями, измеренные на расстоянии 1 м от оборудования. Размеры рассмотренного в [9] оборудования значительно больше расстояния, на котором измерялся шум. Предполагая, что частота и амплитуда колебаний воздуха вблизи оборудования идентичны частотам и амплитудам вибраций, оценим значение амплитуды колебаний для различных частот вибраций.

По результатам измерений уровней звукового давления, представленным в [9], рассчитанные по формуле (4) значения амплитуд перемещений, а также соответствующие значения паразитной составляющей сигнала, связанной с вибрациями оборудования, и рассчитанные по формуле (3), сведены в табл. 2.

Из табл.2 видно, что паразитная составляющая, связанная с вибрациями оборудования, может достигать $500 \mu\text{V}$. Максимум этого паразитного сигнала лежит в полосе частот вибраций от 125 до 2000 Hz и при повышении частоты до 8 kHz паразитная составляющая сигнала снижается на 2–3 порядка. Абсолютная чувствительность фотодиода к вибрациям оборудования $\Delta V/\Delta x$ при этом составила более 60 V/m. Следовательно, для снижения вибрационных помех частоту модуляции сигнала необходимо выбирать не менее 8 kHz. Так как пылевой стенд создает аэродисперсные потоки, адекватные промышленным, то его шумы и вибрации будут носить такой же характер.

Таким образом, из-за шумов и вибраций оборудования стенда происходит модуляция паразитных засветок, приводящих к появлению на выходе измерительного фотодиода дополнительного шумового переменного напряжения 700 мкV, что на 3 порядка выше требуемого порога чувствительности измерителя.

Из представленного примера следует, что для снижения вибрационных помех частоту импульсной модуляции сигнала необходимо выбирать более 8 kHz. При этом необходимо обеспечить устойчивую узкополосную фильтрацию сигнала.

Известно, что одним из методов борьбы с помехами, известными в многочисленных вариантах и играющими в технике передачи сигналов видную роль, является метод накопления, или интегрирования. Одним из радикальных способов повышения амплитудного разрешения при регистрации слабых сигналов, в том числе и оптических при рассеянии зондирующего излучения аэрозольными частицами, является использование синхронного детектирования [10,11].

Таблица 2.

Цементное оборудование	Частота, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Мельница цементная	ΔP , dB	92	95	98	99	122	121	99	88
	$\Delta x \cdot 10^6$, m	6.24	4.44	3.14	1.76	12.39	5.52	0.22	0.03
	ΔV_1 , μV	383	272.5	192.3	108	760	338.7	13.5	1.8
	$\Delta V_1 / \Delta V_{1 \max}$	0.504	0.359	0.253	0.142	1	0.446	0.018	0.003
Печь вращающаяся	ΔP , dB	89	95	96	94	88	89	89	88
	$\Delta x \cdot 10^6$, m	4.42	4.44	2.49	0.99	0.25	0.14	0.07	0.03
	ΔV_1 , μV	271.2	272.5	152.8	60.7	15.2	8.5	4.3	1.8
	$\Delta V_1 / \Delta V_{1 \max}$	0.995	1	0.561	0.223	0.056	0.031	0.016	0.007
Холодильник „Волга-150“	ΔP , dB	74	78	86	88	88	81	84	77
	$\Delta x \cdot 10^6$, m	0.79	0.63	0.79	0.5	0.25	0.06	0.04	0.01
	ΔV_1 , μV	48.3	38.5	48.3	30.5	15.2	3.3	2.3	0.5
	$\Delta V_1 / \Delta V_{1 \max}$	0.998	0.797	1	0.629	0.315	0.07	0.05	0.011

Применение одного акта синхронного детектирования не позволило обеспечить достаточное усиление полезного сигнала и одновременное подавление помех. В [11] было показано, что путем двойной модуляции и соответствующего двойного синхронного детектирования можно дополнительно повысить амплитудное разрешение. Поэтому была предложена организация такого алгоритма обработки сигнала, которая бы предусматривала двойное синхронное детектирование с отличающимися частотами управляющих сигналов на 1–2 порядка [12]. Решение задачи регистрации слабых световых потоков модулированного излучения предложено путем двойной модуляции зондирующего излучения частотами 9–11 kHz и 80–90 Hz с последующим двойным синхронным детектированием. Оптимальный выбор частоты определяется конкретными условиями. В нашем случае он был выбран исходя из диапазона частот вибраций и их вклада в паразитный сигнал [1]. Это обеспечило подавление световых помех, связанных с вибрациями оборудования до 60 dB [12].

Создание усилителя и оптимальный выбор параметров его работы позволили на стенде, предназначенном для моделирования аэродисперсных потоков, провести исследование оптических свойств полидисперсных аэрозолей в воздушных потоках при их импульсной генерации в поток, выполнить экспериментальное исследование индикатрисы рассеяния на полидисперсном аэрозоле в воздушном потоке и определить оптимальные углы интегрального светорассеяния ближнего ИК-излучения на полидисперсном аэрозоле [4]. Кроме того, стендовое оборудование для создания модельных аэродисперсных потоков и их непрерывный контроль с помощью измерителя позволяют определять предельные возможности оптических методов диагностики таких потоков.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты анализа формирования паразитной засветки, модулированной шумами и вибрациями оборудования, механически сопряженного с измерителем, позволили оценить значимость этой засветки по сравнению с

полезным сигналом и предположить эффективный путь ее подавления путем двойной импульсной модуляции и двойного синхронного детектирования на оптимальных частотах. Рассмотренный подход может быть применен к оценке влияния паразитных засветок, модулированных шумами и вибрациями оборудования, механически сопряженного с оптическими измерителями различного исполнения и функционального назначения.

Список литературы

- [1] Rybalko A.V., Charty P.V., Shemanin V.G. // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4316. P. 130–136.
- [2] Privalov V.E., Shemanin V.G., Charty P.V. // Proc. SPIE. 2002. Vol. 5066. P. 140–145.
- [3] Чукардин В.Е., Чартий П.В. // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 9. С. 50–52.
- [4] Privalov V.E., Charty P.V. and Shemanin V.G. // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5447. P. 242–250.
- [5] Привалов В.Е., Рыбалко А.В., Чартий П.В., Шеманин В.Г. // Тез. докл. конф. „Лазеры для медицины, биологии и экологии“. СПб., 2002. С. 37–38.
- [6] Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
- [7] Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения: Уч. пос. для студентов оптических специальностей вузов. СПб.: Политехника, 1991. 240 с.
- [8] Путилов К.А. Курс физики. Т. 1. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика. М.: ГИФМЛ, 1962. 560 с.
- [9] Козулин С.М., Тонких Т.К. // Цемент. 1982. № 10. С. 14–15.
- [10] Телегин Г.И. // ПТЭ. 1985. № 1. С. 121–123.
- [11] Вороний Е.С., Торпачев П.А. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения. Минск: Университетское, 1988. 208 с.
- [12] Привалов В.Е., Чартий П.В., Шеманин В.Г. // Прикладная оптика: Сб. тр. 6-й Междунар. конф. СПб., 2004. Т. 1. С. 242–246.