

А.М. НИКИТИН, (г. Харьков, НТУ"ХПИ")

## РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРА И ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ ЛДИС

Приведено оцінний розрахунок потужності випромінювача, що дозволяє одержати стійкий сигнал лазерного доплеровського вимірника швидкості (ЛДВШ), для оптичних систем, адаптованих до вимірювання характеристик потоків у складних каналах енергетичного та теплотехнічного устаткування. Показано ефективність алгоритму на етапі компоновання оптичних схем ЛДВШ.

Estimated calculation of the radiation power is adduced, permitting to receive a steady signal of a laser Doppler anemometer (LDA), for the optical systems adapted to measurements of flows characteristics in the composite channel power and heat engineering of the equipment. Efficiency of algorithm at a phase of layout LDA optical schemes is shown.

Конструкции оптических схем (ОС) лазерных доплеровских измерителей скорости (ЛДИС) [2, 3] разрабатываются с учетом условий измерений, выполняемых для ряда экспериментальных задач. Поэтому не существует универсальных схем измерителей, удовлетворяющих массовым требованиям [2]. Учитывая ограничения и особенности доступа к потокам рабочих сред в каналах теплоэнергетического оборудования, в первом приближении, компоновка оптическая схема должна удовлетворять следующим требованиям. Расстояние от поверхности выходной линзы до измерительного объема не менее  $f_{но}$ . Размер разделяющего оптического окна в стенке канала не более  $d_k$ . Диапазон измеряемых скоростей  $[V_{min} + V_{max}]$  определяется условиями эксплуатации изучаемого канала.

Сравнение и анализ реализованных вариантов ОС [1, 2, 3] позволяет выбрать интерференционную схему ЛДИС с регистрацией отраженного сигнала как наиболее пригодной в изложенных условиях измерений. Схема, приведенная на рис. 1, имеет простую конструкцию и высокую оптическую эффективность. Лазерный пучок расщепляется на два, которые в свою очередь проходят через отверстия в зеркале, которое наклонено под углом  $45^\circ$  по отношению к оптической оси. Объектив  $L_1$  направляет оба луча в фокус, расположенный в области измерений, тем самым формирует измерительный объем ЛДИС и свет, рассеянный назад, собирается тем же объективом  $L_1$  и затем с помощью зеркала направляется на детектор. Объектив  $L_2$ , вместе с диафрагмой  $M_2$  служит для отображения системы интерференционных полос на фотодетектор. Диафрагма  $M_2$ ,

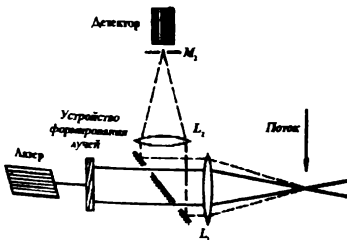


Рис. 1. Схема оптической системы.

установленная перед детектором, служит для ограничения наблюдаемой области.

Существенное преимущество такой схемы состоит в том, что она устойчива в юстировке в процессе работы даже тогда, когда пучки преодолевают более одной границы оптических сред с различными показателями преломления. В случае использования изолирующего окна, выполненного из оптического стекла излучение за выходной поверхностью ОС ЛДИС встречает две оптические границы до фактического фокуса выходного объектива ОС. Эту систему можно сделать достаточно универсальной, если предусмотреть возможность использования сменных объективов  $L_1$ .

Основное требование к рассеивателям лазерного излучения в потоке состоит в том, чтобы их присутствие не искажало измеряемые параметры течения. В модели экспериментального изучения труднодоступных участков течений в качестве рассеивателей принимаются частицы воды, вводимые в поток на достаточном удалении от места измерений. Такой способ позволит исключить влияние формы устройств впрыска на значения измеряемых параметров.

Необходимую концентрацию рассеивателей в потоке можно получить при установке вперед по потоку двух устройств впрыска на удалении  $\delta = 3 \cdot D_{жс}$ , где  $D_{жс}$  - характерный размер исследуемого канала. В случае турбулентных течений размеры зоны впрыска и концентрации рассеивателей в потоке подбираются в процессе подготовки экспериментальных моделей.

Теория рассеяния, в настоящее время, описывает в аналитических функциях рассеяние на сферических оптически однородных частицах. В [2] показано, что независимо от формы рассеивателей полная мощность рассеянного излучения  $p_s$  пропорциональна плотности мощности излучения  $p_0$ , падающего на частицу  $p_s = p_0 \sigma$ . Здесь  $\sigma$  - полное сечение рассеяния частицы, для сферической формы определено в аналитическом виде. Кроме того, индикатриса рассеяния показывает, что среднее соотношение между рассеянной и отраженной мощностью для применяемых частиц примерно 82/13 в процентах от падающей на частицу мощности излучения.

Одним из существенных моментов при конструировании ЛДИС, определяющим возможность реализации эксперимента и ориентировочные затраты связанные с измерениями является оценка мощности источника когерентного излучения. В составе ЛДИС используются лазеры малой и средней мощности видимого диапазона спектра. Наиболее распространены He-Ne генераторы с длиной волны  $\lambda = 6,328 \text{ мкм}$ . Эти лазеры генерируют излучение небольшой мощности –  $0,001 \div 0,1 \text{ Вт}$ , с малой шириной спектральной линии и незначительным углом расхождения луча.

Ориентировочный расчет параметров ОС с определением мощности лазера, необходимой для успешной юстировки и получения сигналов ЛДИС,

выполняется в двух направлениях: по ходу лучей, формирующих измерительный объем (ИО) ЛДИС и далее по ходу отраженного сигнала до приемной поверхности детектора см. рис. 1.

Принимая нормальное распределение мощности излучения в сечении луча лазера, расчет параметров ОС можно привести к следующей процедуре.

- Определение параметров интерференционной структуры в ИО и его размеров без учета предварительного частотного сдвига.
- Параметров измерительного объема с учетом модуляции лазерного излучения.
- Определение мощности излучения, необходимой для регистрации изменений характеристик поля в ИО.

Два параллельно распространяющихся лазерных луча при симметричной фокусировке создают линейную интерференционную структуру в малом объеме с центром в точке фокуса. Проекция подобной структуры приведена на рис. 2.

Введем систему координат, связанную с «центром тяжести» измерительного объема (рис.2.). Если предположить, что ось X направлена в сторону движения среды, то размеры  $\Delta x$  и  $\Delta y$  будут определять величину центрального сечения ИО. Вдоль оси Z, перпендикулярной плоскости рисунка, размер интерференционной структуры  $\Delta z$



Рис. 2. Характеристики интерференционной структуры

Для немаскированных лазерных лучей период интерференционной структуры определен [2]

$$\Delta = \frac{\lambda}{2} \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - длина волны лазерного излучения,  $\theta$  - угол сведения формирующих ИО лучей. В рассматриваемом случае  $\lambda = 6,328 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . Угол сведения определяется по принятой апертуре разделяющего устройства и удалению до ИО как  $\theta = \arctg(d_K / f_{ИО})$ .

Размеры измерительного объема, соответствующие рис. 2 определены в [3]

$$\Delta x = 2r_0 / \cos \theta, \quad \Delta y = 2r_0, \quad \Delta z = 2r_0 / \sin \theta \quad (2)$$

Учитывая заданный в технических характеристиках лазера радиус перетяжки луча  $r_0$ , можно определить (2) диаметры эллипсоида, ограничивающего измерительный объем. Для регистрации оптического отклика, важным параметром является значение числа интерференционных полос в центральном сечении ИО. Определим этот параметр согласно [3]

$$N = \frac{4r_0 \cdot \text{tg} \theta}{\lambda} \quad (3)$$

Доплеровский сдвиг частоты, соответствующий полученным характеристикам ИО, определяем для диапазона измеряемых значений скорости  $[V_{\min} \div V_{\max}]$  течения:

$$\Delta f_D = 4\pi V \cdot \sin \theta / \lambda \quad (4)$$

Базовый частотный диапазон сигналов ЛДИС принимаем, согласно (4)  $[\Delta f_D(V_{\min}) \div \Delta f_D(V_{\max})]$ .

Для оценки длительности единичных откликов, формирующих спектр доплеровского сигнала, необходимо определить среднее время пролета частицы через ИО. Согласно [2], среднее время пролета частиц, рассеивающих лазерное излучение, вычисляется по среднему значению скорости из принятого диапазона  $V_m = 0.5(V_{\max} + V_{\min})$ . Зная размер ИО,

$$t_m = \Delta x / V_m \quad (5)$$

Временное разрешение схем приема и обработки сигналов ЛДИС может быть удовлетворительным на уровне  $\Delta t \approx 10^{-7} \text{ с}$ .

Предварительный частотный сдвиг спектров сигналов ЛДИС предоставляет ряд преимуществ оптическим схемам и измерителям. Среди преимуществ отметим: возможность регистрации знака измеряемой скорости, что важно при обнаружении зон возвратных течений; повышение точности измерений, связанной с отсутствием «аппаратного спектра»; увеличение числа импульсов в единичном отклике ЛДИС и др.

Применение двух координатного модулятора [4] вместо устройства формирования освещающих лучей (рис. 1), работающего в режиме Рамана-Ната, позволяет сдвинуть спектр сигналов ЛДИС в частотной области на величину, кратную частоте модуляции. При использовании модулятора одновременно с модуляцией лучей решается проблема разделения исходного излучения на равные по мощности лучи, что существенно влияет на качество принимаемых сигналов. При этом число активных максимумов в дальней зоне может достигать 16. Принимаем, что ОС формирует ИО двумя первыми максимумами в дифракционной картинке, создаваемой акустооптической ячейкой, с частотами модуляции  $\pm \omega_m$ . В этом случае в ИО создается «бегущая» интерференционная структура, каждая линия которой движется в сторону луча с положительным сдвигом фазы.

Диапазон измерений можно увеличить  $[-V_{\max} \div V_{\max}]$  с целью исключения ошибок в определении направления вектора скорости. Скорость движения фронта тень-свет в ИО определяется

$$v_f = 2\Delta\omega_m \quad (6)$$

Двигаясь с найденной скоростью, время существования единичного фронта

$$t_f = \Delta x / v_f = \Delta x / 2\Delta\omega_m \quad (7)$$

Определим число импульсов в сигнале отклика точечной частицы проходящей вдоль оси X, рис. 2 и соответствующий частотный сдвиг на границах измеряемого диапазона:

$$n_{\pm} = \frac{(v_f - v_r)}{\Delta x} \quad \text{и} \quad \Delta f = 4\pi \sin \theta / \lambda + \omega_0 \quad (8)$$

при дополнительном частотном сдвиге  $\omega_0 = 2\omega_m$

Частотный диапазон сигналов ЛДИС с применением двух координатного модулятора [4] принимается  $[(\omega_0 - \Delta f_D) + (\omega_0 + \Delta f_D)]$ . Очевидно, ограничение на частоту модуляции со стороны ОС:

$$\omega_m \geq \Delta f_D / 2. \quad (9)$$

Применение в качестве приемника рассеянного излучения фотоэлектронного преобразователя типа ФЭУ позволяет, исходя из его технических данных, оценить нижнюю границу мощности квантового генератора в реализуемой схеме рис.1. В рамках оценочного расчета параметров элементов ЛДИС допустим справедливость рэлеевского рассеяния света на малых сферических частицах  $|\tilde{n}\rho| \ll 1$ , где  $\tilde{n}$  комплексный относительный показатель преломления в системе среда-частица,  $\rho = 2\pi a / \lambda$  - относительный размер частицы.

Полное сечение рассеяния частицы [2]

$$\sigma = \frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4} \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \quad (10)$$

Минимальная плотность мощности излучения попадающая на оптически чувствительный элемент ФЭУ позволяет определить полезную плотность излучения, отраженного частицей

$$p_e = \frac{\chi P_{\min}}{\sigma} = \frac{3\lambda^4 \chi P_{\min}}{128\pi^5 a^6} \left( \frac{n^2 + 2}{n^2 - 1} \right)^2 \quad (11)$$

Учитывая, что в реальных условиях удастся сфокусировать на приемной поверхности ФЭУ около  $10^2$  рассеянного света, мощность излучения, сфокусированная в ИО, определяется [2]

$$P_f = p_e \Delta x \Delta y = \frac{3\lambda^4 r_0^2 \chi P_{\min}}{32\pi^5 a^6 \cos \theta} \left( \frac{n^2 + 2}{n^2 - 1} \right)^2 \quad (12)$$

Определим минимальную мощность лазера, учитывая потери мощности при прохождении излучения через оптический раздел фаз. Принимаем для оптически непросветленных поверхностей потери  $\mathcal{P}$  до 4% мощности излучения, с многослойным просветлением потери уменьшаются до 0,5%. В рамках предварительного расчета можно считать все оптические поверхности непросветленными. Для ОС, приведенную на рис.1, с учетом четырех границ

разделительного окна определяем число поверхностей, встречаемых лучом в оптическом канале ЛДИС  $s = 15$ , тогда мощность лазера:

$$P_l = \frac{N_m P_f}{(1 - \delta P)^s} \quad (13)$$

где  $N_m$  - число эквивалентных максимумов на выходе модулятора [4], работающего в режиме дифракции Рамана-Ната.

Результаты расчетов компонентов оптической схемы ЛДИС (рис.1) для измерения скорости потоков газообразной рабочей среды в каналах с ограниченным доступом с диапазоном от  $-1$  до  $1$  м/с приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры компонентов оптической схемы ЛДИС.

Компонент	Параметр	Ед. изм.	Значение
Лазер	<i>Длина волны излучения</i>	м	6,328E-07
	<i>Мощность (не менее)</i>	Вт	94E-3
Модулятор двухкоординатный	<i>Базовая частота модуляции</i>	Гц	2,5E06
	<i>Число активных максимумов</i>	шт	16
Объектив-формирователь ИО	<i>Фокусное расстояние</i>	м	0,1÷0,12
	<i>Апертура</i>	м	0,04÷0,05
	<i>Относительное отверстие</i>		2
Объектив детектора	<i>Фокусное расстояние</i>	м	0,028
	<i>Апертура</i>	м	0,02÷0,05
	<i>Относительное отверстие</i>		2,4
Приемник –	ФЭУ 49		
Электронная система обработки	<i>Частотный диапазон</i>	Гц	1÷9E06
	<i>Временное разрешение</i>	с	1E-07

Мощность лазера в таблице 1 является базовой величиной, так как при установке просветленной оптики  $L_1$  и  $L_2$  позволяет уменьшить данное значение до 83E-3 Вт. Такую мощность может развивать ЛГ-38. Предлагаемый расчет может использоваться на стадии проектирования ОС ЛДИС или при контроле и поиске позиций юстировки в процессе наладки. Элементы ОС экспериментальной установки, приведенной в [4] компоновались с учетом изложенных алгоритмов. Алгоритм может применяться для выбора элементов оптических устройств, использующих лазеры в качестве источников излучения.

**Список литературы** 1. Клифф У Оптические и акустические методы измерения. В кн. «Турбулентность принципы и применения» под ред. У Фроста, Т. Моулдена., М.: «Мир», 1980, с 443-472. 2. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичус Б.С Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М.: Наука. 1982. – 304с. 3. Дюррани Т., Грейтид К. Лазерные системы в гидродинамических измерениях: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 336 с. 4. Товажнянский Л.Л., Капинос В.М., Никитина Е.В., Никитин А.М. Лазерная диагностика потоков. Часть 1. Двумерные модуляторы лазерного излучения. Вестник Национального технического университета «ХПИ» Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Динамика и прочность машин. – Харьков: НТУ «ХПИ» 2003, №12. Т.1, с.139-146.