

УДК 304.7 : 235

Разработка и применение лазерного доплеровского анемометра с прямым спектральным анализом для исследования высокоскоростных многофазных потоков*

С.В. Поплавский, А.Ю. Нестеров, В.М. Бойко

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: s.poplav@itam.nsc.ru

Работа посвящена созданию лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) для исследования высокоскоростных многофазных потоков. На основе анализа методов доплеровской анемометрии сформулированы требования к современным ЛДА для решения указанных задач и пути их реализации с учетом современного состояния лазерной техники и спектроскопии. Представлен прототип анемометра с прямым спектральным анализом на основе новейшей элементной базы. Показаны его работоспособность на примере сверхзвуковых газожидкостных струй и возможность его применения для других задач.

Ключевые слова: лазерная доплеровская анемометрия, прямой спектральный анализ, спектральные приборы высокого разрешения, диагностика высокоскоростных многофазных потоков.

Введение

В ряду параметров многофазных потоков критически важными являются локальные скорости газовой и дисперсной фаз в условиях скоростной неравновесности, особенно выраженной в градиентных потоках со скачками газодинамических параметров. Очевидно, что для таких традиционных инструментов, как трубка Пито и термоанемометр, измерение скорости в многофазных средах является неразрешимой задачей. Не подходит также и метод PIV (Particle Image Velocimetry) в силу его чувствительности к размерам трассеров, которые должны составлять $\sim 10\text{--}50$ мкм (в газожидкостных потоках размер капель составляет до 2 мм), и ограничений концентрации дисперсной фазы. В меньшей степени это касается метода PTV (Particle Trek Velocimetry), но и для него существует ограничение по концентрации капель. Таким образом оказывается, что лазерный доплеровский анемометр (ЛДА) — это безальтернативный метод для исследования многофазных течений. Действительно, доплеровская анемометрия более 50 лет применяется в технике и науке, в частности, в аэрофизических экспериментах для диагностики течений жидкости, газовых и многофазных потоков, пламени и плазмы в каналах, соплах и открытых струях. На основе оптического эффекта Доплера — сдвига частоты света, рассеянного на движущемся объекте, — создано большое число схем, и, несмотря

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610137-0).

на различия принципов измерения сдвига частоты рассеянного света, их общими достоинствами являются бесконтактность и высокая пространственная локализация измерений. Для регистрации сдвига частоты используются два подхода. К первому относятся гетеродинные методы [1–5] — оптический аналог измерения частоты в электронике, ко второму — прямой спектральный анализ (спектральные ЛДА) [5–8]. В основе гетеродинных схем лежит смешение двух лучей с различными частотами. В зависимости от способа смешения возникает либо биение интенсивности света в точке, либо пространственная модуляция интенсивности. Им соответствуют два описанных ниже способа реализации гетеродинного принципа.

1. Исходный лазерный луч разделяется на опорный (гетеродин) и зондирующий. Рассеянный на объекте свет зондирующего луча и гетеродин соосно фокусируются на фотоприемнике. При движении объекта на фотоприемнике возникает биение интенсивности с разностью частот лучей, т.е. с частотой доплеровского сдвига, биение преобразуется в электрический сигнал и анализируется средствами электроники [1].

2. Лазерный луч разделяется на два равных луча. Они фокусируются в точке измерения, где возникает пространственная модуляция интенсивности — интерференционная решетка. Частицы, пересекая ее, рассеивают свет с модулированной интенсивностью, а частота модуляции равна доплеровскому сдвигу [2–4]. Рассеянный свет регистрируется фотоприемником, а по частоте модуляции его сигнала определяется доплеровский сдвиг и скорость объекта. Эта так называемая «дифференциальная» схема наиболее популярна у приборостроителей из-за простоты в части оптики и перспектив переноса большинства проблем метода в область компьютерной обработки данных. Приборы на ее основе доведены до уровня коммерческих и выпускаются ведущими оптическими фирмами мира (DANTEC, TSI).

После первой публикации по ЛДА в 1964 году [1] гетеродинная тематика начала развиваться и в нашей стране. В 70-80 годы XX века значительный вклад в нее внесли исследования институтов ИАиЭ, ИТ СО АН СССР (Новосибирск) [3, 4]. В дальнейшем эти работы имели успешное продолжение благодаря прогрессу в оптике и электронике. Со времени создания первых схем на сравнительно слабых газовых лазерах произошли огромные перемены в области развития полупроводниковых лазеров, и отечественные системы на их основе на несколько лет опередили лучшие мировые аналоги [4].

При всей обоснованности физических принципов гетеродинных ЛДА эти методы имеют ряд принципиальных ограничений. Так, например, при длине волны света $\lambda = 0,63$ мкм (He-Ne лазер) и угле сведения лучей $\alpha = 5^\circ$ шаг интерференционной решетки $s = \lambda/2 \sin(\alpha/2) = 7,2$ мкм [3]. При скорости трассера $v \sim 100$ м/с частота модуляции интенсивности рассеяния $v/s = 13,85$ МГц, а частотный диапазон приемника должен быть хотя бы на порядок выше, т.е. > 140 МГц. Для «зеленых» лазеров ($\lambda = 0,52$ мкм) данные показатели еще хуже. Это ограничивает верхний предел измеряемой частоты модуляции и скорости. Например, в работе [4] максимальная измеряемая скорость едва достигает 200 м/с. Есть данные, заявленные «Dantec Dynamics», по регистрации «длительности доплеровского всплеска» ~ 50 нс, что для капли 50 мкм соответствует скорости 1000 м/с, а фирма «TSI» заявляет о измерении максимальной скорости более 1000 м/с. Однако в двух указанных случаях измерения выполнены с одиночной частицей и имеют скорее демонстрационный характер, а реальные исследования на этих приборах с такими скоростями в литературе не описаны.

Другое ограничение применения гетеродинных ЛДА связано с положением, что максимальная глубина модуляции интенсивности рассеяния возможна при ограничении размера трассеров: $d < s$, т.е. при $d < 7$ мкм. По тем же соображениям ограничена и концентрация частиц — их объемная доля должна быть $\leq 10^{-6}$ [2]. И, наконец, рассмотренные схемы крайне чувствительны к градиентам плотности исследуемой среды, т.к. рефракция зондирующих лучей нарушает их сведение в одной точке. Таким образом, эти методы малоприменимы для высокоскоростных и тем более сверхзвуковых потоков, а для много-

фазных потоков с высокой концентрацией частиц они не подходят совсем [5]. Для таких задач ЛДА с прямым спектральным анализом незаменимы, но, несмотря на востребованность, их применение в аэрофизических экспериментах до сих пор были ограничены лабораторными образцами, не доведенными до состояния коммерческих продуктов. Более того, успешные работы по спектральным ЛДА 70–90-х годов в ИТПМ СО АН (Новосибирск) [6–8], ФТИ им. Иоффе (Санкт-Петербург) [5] и в МЭИ (Москва) [3] не получили развития даже на уровне лабораторных изделий, а в старой конфигурации они стали не актуальны. В те годы это было связано с быстрым и невосполнимым устареванием одночастотных газовых лазеров и с отсутствием быстродействующей обработки спектров.

В 80–90-х годах наметилась пауза в развитии спектральных ЛДА, появились новые подходы к диагностике потоков, составившие важный раздел в методах оптического спектрального анализа. К ним относятся доплеровская диагностика на основе лазерно-индуцированной флуоресценции, измерение доплеровских сдвигов частоты с помощью абсорбционных частотных детекторов, панорамные ЛДА, фазовые ЛДА (PDA), комбинационное рассеяние света и нелинейные оптические методы [5]. Однако в свете новых задач аэрофизики классический ЛДА с прямым спектральным анализом не потерял своей актуальности, и возврат к нему на современном техническом уровне открывает новые возможности при исследовании высокоскоростных многофазных потоков, где он и ранее не имел альтернативы.

Цель настоящей работы — построение инженерной платформы современного спектрального ЛДА и создание на ее основе прототипа прибора (в дальнейшем — прототипа) с новейшей элементной базой, обеспечивающей не только высокий уровень исследований, но и технологичность исполнения и удобство использования, сравнимые с серийными образцами.

1. Требования к спектральным ЛДА для аэрофизических экспериментов

Ядро схем ЛДА с прямым спектральным анализом составляют спектральные приборы сверхвысокого разрешения — многолучевые интерферометры, и требования к ним за время существования этих методов существенно не изменились. Основные их характеристики — расстояние между зеркалами и тип геометрии резонатора (сферический, полусферический, плоский, клиновидный), а также качество поверхностей, материалы и плотность напыления зеркал. Единственным, но важным изменением интерферометров за истекшие 50 лет явилось их конструктивное исполнение. На смену перестраиваемым интерферометрам, слишком чувствительным к внешним воздействиям, пришли интерферометры с фиксированным положением зеркал, называемые оптическими эталонами.

В отличие от неизменяемой консервативной части — спектральных приборов сверхвысокого разрешения, — в других компонентах доплеровской анемометрии виден значительный прогресс: созданы мощные одночастотные лазеры, производится цифровая регистрация спектров и компьютерная их обработка. Необходимость соединения столь разных технологий в одном изделии требуют построения новой инженерной платформы оптико-электронного комплекса регистрации доплеровского сдвига частоты. Рассмотрим, как совокупность новых технологий влияет на архитектуру современного ЛДА с прямым спектральным анализом, в чем особенности его применения и какие преимущества дает этот подход.

1.1. Спектральная чувствительность ЛДА

Верхний предел измеряемых скоростей спектральных ЛДА в отличие от гетеродинных схем не ограничен, т.к. определяется частотным диапазоном спектрального прибора. Нижний предел скоростей зависит лишь от чувствительности схемы, которая в свою

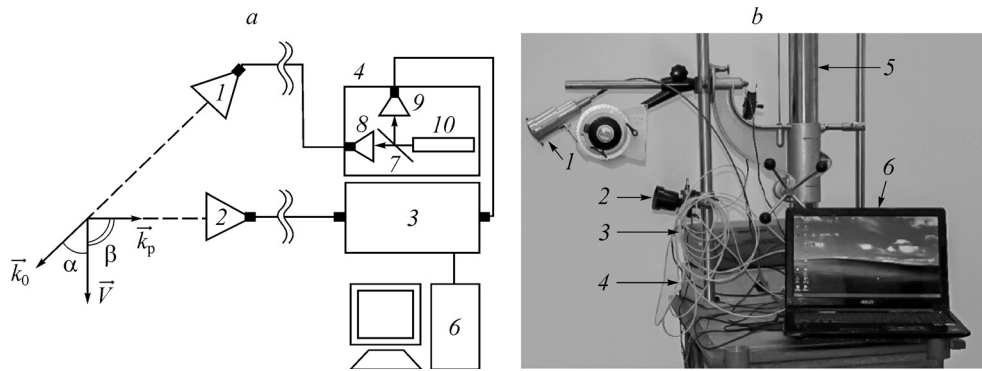


Рис. 1. Схема ЛДА (а) и общий вид прибора (b).

1 — коллиматор зондирующего света, 2 — коллиматор рассеянного света, 3 — анализатор спектра Angstrom WS-7, 4 — оптический блок, 5 — штатив, 6 — ПК в системе управления и обработки данных, 7 — светоделительное стекло, 8 — вход зондирующего луча в световод, 9 — вход опорного луча, 10 — лазер.

очередь определяется заданной точностью измерения скорости. Следующие оценки выполнены для точности $\pm 5\text{--}7$ м/с. На рис. 1а показана схема предлагаемого спектрально-го ЛДА и геометрия волновых векторов приходящего $\vec{k}_0$ и рассеянного $\vec{k}_r$ света в точке измерения скорости. Если волновые векторы $\vec{k}_0$ и $\vec{k}_r$ лежат в одной плоскости с вектором скорости частиц $\vec{V}$, доплеровский сдвиг частоты света $\Delta\omega$ и модуль скорости V связаны зависимостью [2, 3, 5–8]:

$$V = \frac{\lambda_0 \cdot \Delta\omega}{\cos \alpha + \cos \beta}. \quad (1)$$

Отсюда для скорости $V \approx 5$ м/с при $\alpha = \beta = 0$ получим максимальный доплеровский сдвиг $\Delta\omega \approx 18,8$ МГц. Однако такая геометрия в аэрофизическом эксперименте неудобна и зачастую неосуществима. При реалистичных углах $\alpha = \pi/3$ и $\beta = \pi/6$ (или наоборот) сдвиг частоты получается несколько меньше — $\Delta\omega = 12,8$ МГц. Это хуже с точки зрения чувствительности схемы, но такая геометрия вполне реализуема на большинстве экспериментальных установок. И, наконец, в неблагоприятной конфигурации, когда один из углов α или β равен $\pi/2$, а второй $\pi/4$, доплеровский сдвиг $\Delta\omega \approx 10$ МГц дает удовлетворительную погрешность $< 7,5$ м/с и обнадеживающую работоспособность схемы. Таким образом, чувствительность $\Delta\omega \approx 10$ МГц достаточна для спектрального ЛДА, и даже имеется некоторая свобода выбора геометрии для условий конкретных опытов.

1.2. Спектральные приборы для ЛДА

Спектральную чувствительность $\Delta\omega \approx 5\text{--}10$ МГц имеют интерферометры Фабри–Перо (ИФП) с плоскими или конфокальными резонаторами статического или сканирующего типа [5, 8] и интерферометры Физо [2, 7]. Они относятся к многолучевым спектральным приборам. У первых зеркала установлены параллельно, у вторых — клиновидно. ИФП формирует систему концентрических колец равной площади с нелинейным сдвигом линий при сдвиге частоты света [8, 9]. Несмотря на неудобство работы со спектром при нелинейной дисперсии, особенно выраженной у конфокальных ИФП, они часто применялись в ЛДА лабораторного изготовления [6, 8] из-за их высокой светосилы при известных проблемах с маломощными газовыми лазерами.

Интерферограмма Физо представляет собой линии равной толщины с линейной дисперсией [8]. Это значительно упрощает ее обработку, и даже простые средства реги-

страции позволяют пропорционально преобразовывать сдвиг полосы в электрический сигнал [7], а значит, измерять не только среднюю скорость, но и пульсации скорости.

Заметим, что при компьютерной обработке данных сложность аппаратной функции не важна, если она точно известна, но при выборе конфигурации сложного прибора предпочтительны те схемы, у которых во всей цепочке процедур получения и обработки данных характеристики линейные, как у эталона Физо. Если учесть его меньшую требовательность к качеству зеркал [5, 8, 9] и достаточную мощность современных лазеров, можно заключить, что эталон Физо — наиболее подходящий спектральный прибор для ЛДА с прямым спектральным анализом. Таким образом, основные требования к спектральным ЛДА для аэрофизических экспериментов состоят в следующем. Чувствительность спектрального прибора должна быть не ниже $\Delta\omega \approx 10$ МГц. Для эталона Физо, впрочем, как и для ИФП, это возможно при высоком разрешении записи спектра — $\leq 0,3\%$ области свободной дисперсии интерферометра. Действительно, при расстоянии между зеркалами $l = 40$ мм и области свободной дисперсии $\Omega = c/2l = 3,75$ ГГц (c — скорость света) чувствительность к сдвигу линии должна составлять $\Delta\omega/\Omega \sim 3 \cdot 10^{-3}$, что вполне достижимо при современных алгоритмах обработки спектров. База $l = 40$ мм предлагается производителем эталона как испытанная для оптимального соотношения спектральной чувствительности и устойчивости изделия к акустическим и термическим возмущениям. При тестировании схемы использовался также эталон с базой 80 мм с вдвое лучшей чувствительностью, но для высокоскоростных потоков это не актуально, и далее приводятся данные только для эталона с базой $l = 40$ мм.

И наконец, следует отметить, что возможность перестроения схемы для различных задач наиболее удобно реализовать при модульном построении прибора с легко сопрягаемыми элементами. В предлагаемой схеме все элементы — лазер, осветитель, приемная оптика рассеянного света и анализатор спектра — соединяются оптоволоком.

2. Схема ЛДА с прямым спектральным анализом на современной элементной базе

Анализатор спектра — это центральный элемент схемы, определяющий ее основные характеристики, а для модульной архитектуры схемы следует использовать серийный образец. В настоящее время существует ряд коммерческих анализаторов спектра, при этом из доступных среди них необходимую чувствительность имеет серия «High Precision Wavelength Meters: WS HighFinesse Angstrom Series» производства фирмы «Angstrom» (Россия) [10, 11]. В настоящей работе используется «лямбдамер» (прямой перевод английского термина Wavelength Meters) Angstrom WS-7 из этой серии. Он обеспечивает спектральное разрешение 5 МГц, чему отчасти обязан эталону Физо, а также компьютерной обработке спектра. Вся серия выполнена в едином формате «закрытой архитектуры»: в теплоизолированном шумопоглощающем корпусе с оптоволоконным вводом опорного и рассеянного света. Это позволяет располагать прибор вне зоны действия вибрации, высоких акустических и тепловых нагрузок (рис. 1). Вблизи объекта находятся лишь коллиматоры — осветительный (1) и приемный (2), соединенные многомодовыми световодами с лазером и анализатором спектра соответственно.

Оптический блок 4 содержит лазер 10, коллиматоры ввода зондирующего 8 и опорного 9 луча от светоделительного стекла 7. В опорном канале применяется одномодовый световод диаметром 8 мкм. В спектральном приборе WS-7 3 используется эталон Физо с базой 40 мм и областью свободной дисперсии, равной 3,75 ГГц. Два световодных входа прибора WS-7 обеспечивают работу в режиме компаратора, что позволяет проводить сравнение спектров рассеянного и опорного света. Это дает возможность использовать лазеры без точной стабилизации длины волны [10–12]. В качестве источника

излучения используется DPSS Nd:YAG-лазер ($\lambda = 0,532$ мкм) мощностью 128 мВт. В этой конфигурации схема регистрирует доплеровский сдвиг частоты рассеянного излучения с погрешностью < 10 МГц, что соответствует скорости с точностью ± 5 м/с. Это подтверждено в ходе калибровки по скорости поверхности вращающегося диска, обороты которого контролировались тахометром с погрешностью < 1 %.

3. Особенности работы схемы ЛДА при высокой концентрации спрея

Рассмотрим некоторые особенности работы прототипа ЛДА на основе опыта исследований сверхзвуковых газожидкостных струй, а также возможность применения прибора для других задач.

3.1. Временное разрешение схемы

Временное разрешение прибора определяется периодом накопления сигнала в системе регистрации спектра — экспозицией, и зависит от интенсивности излучения на входе анализатора спектра. Для контроля этого параметра в интерфейсе WS-7 предусмотрена возможность изменения экспозиции от 1 мс и выше в зависимости от интенсивности рассеянного света. Таким образом, максимальная частота записи спектра составляет 1 кГц. В стационарных потоках такая частота «съемки» может показаться избыточной, но для измерений пульсаций скорости трассеров в точке она будет полезна.

Существует также важный класс задач, где предлагаемый прибор может быть полезен — это нестационарные потоки, например, течение в импульсных аэродинамических трубах с характерным временем режима 100–200 мс. Измерения скорости в ходе всего пуска — выход на режим, сам режим и релаксация газа в характерных точках течения — очень актуальны, но для многих импульсных труб они отсутствуют. Такие измерения могут выполняться предлагаемым ЛДА как для аттестации экспериментальных установок, так и для регулярных исследований при частоте съемки, начиная со 100 Гц.

Что касается газожидкостных потоков с высокой концентрацией капель, то интенсивность рассеяния здесь достаточно высокая, и прототип надежно работает при экспозиции 200 мс на рассеянии «назад», как показано на рис. 1. Характерные параметры процесса следующие: в ближнем следе струи объемная концентрация спрея $K \approx 10^{-3}$, в дальнем следе — $K \approx 10^{-4}$ [13], мощность лазера 128 мВт, частота записи спектра 5 Гц. При необходимости увеличить частоту съемки спектра или исследовать более разреженные спреи требуется источник света большей мощности. Впрочем, при дефиците рассеянного света можно перестроить периферию прибора в конфигурацию на рассеяние «вперед». Тогда при том же источнике света и той же концентрации спрея интенсивность рассеяния значительно возрастет, а частота записи спектра может быть увеличена.

3.2. Пространственное разрешение схемы

Считается, что пространственное разрешение ЛДА определяется размером фокуса осветителя, но в плотных спреях все значительно сложнее. В этом случае прилегающие к точке фокуса конические области тоже обладают высокой интенсивностью свечения, имеющего тенденцию к затуханию вдоль оси конуса из-за потерь на рассеяние. Такие области получили название «светящихся конусов». В связи с этим применение спектральных ЛДА в двухфазных потоках вызывает ряд вопросов: каков характер ослабления света в спрее; какие параметры среды определяют процесс; на какую глубину возможно зондировать двухфазную среду сфокусированным пучком света и т.д.

Далее будут полезны следующие оценки. Будем считать, что потери света $dI(x)$ в сечении x светового конуса радиусом $R(x)$ пропорциональны относительной площади частиц радиусом r : $N\pi r^2/\pi R^2(x)$, где $N = 3K \left[R^2(x)/r^3 \right] dx/4$ — число частиц в элемен-

тарном слое конуса dx при объемной концентрации K . В результате получаем обыкновенное дифференциальное уравнение $dI(x) = (3K/4r)I(x)dx$, проинтегрировав которое имеем:

$$I(x) = I_0 \exp [-(3/4r)Kx]. \quad (2)$$

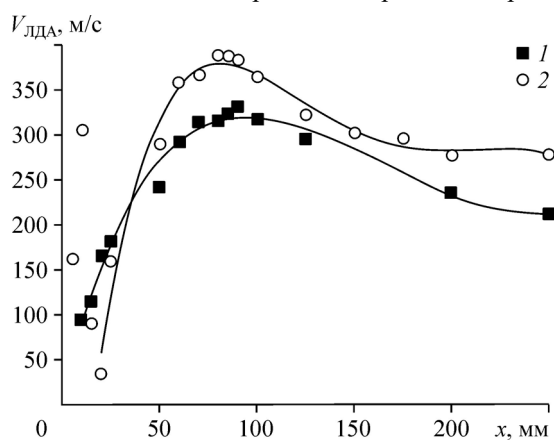
Интересно, что зависимость (2) имеет тот же вид, что и закон Бугера–Ламберта–Бера, определяющий ослабление *параллельного* монохроматического пучка света в поглощающей среде. По аналогии с этим законом величина $3/4r$ — это экстинкция, а вместо молярной концентрации поглощающей примеси среды здесь присутствует объемная концентрация дисперсной фазы K . Однако в рассматриваемом авторами случае пучок света является не параллельным, а сфокусированным. Сходство закона Бугера–Ламберта–Бера для параллельного света с формулой (2) для конического пучка объясняется тем, что рост интенсивности света при сужении в конусе компенсируется снижением числа рассеивающих частиц в меньших сечениях пучка. В результате интенсивность рассеяния на частицах от сечения к сечению конического луча изменяется в соответствии с формулой (2), т.е. как в параллельном луче.

Из соотношения (2), в частности, следует, что при радиусе капель $r \sim 10^{-4}$ м и концентрации $K \sim 10^{-4}$ ослабление света в «е» раз будет иметь место на длине $4/3$ м. В случае, рассматриваемом авторами, протяженность двухфазной области составляет ~ 10 см и заметного ослабления света на этой длине не наблюдается. Кроме формального нарушения локальности измерений, эффект «светящихся конусов» имеет и другой, возможно, более важный аспект. В неоднородных потоках рассеяние из прилегающих к точке фокуса областей несет информацию о совершенно других скоростях потока, отличных от скорости в фокусе, и привносит отличный от фокуса доплеровский сдвиг в рассеянный свет. Это не только приводит к искажению спектра рассеяния, но может влиять на сдвиг линии целиком, а уровень спектрального анализа на настоящий момент не позволяет отделить вклад артефакта от основного эффекта.

Вообще говоря, за время экспозиции через фокус осветителя также проходят частицы с разными скоростями, и когда-нибудь это может стать отдельной задачей анализа спектра рассеянного света для определения дисперсии скоростей частиц. Спектральные приборы с необходимым для этого разрешением ≤ 1 МГц уже существуют, например, в серии «High Precision Wavelength Meters: WS HighFinesse Angstrom Series». Однако в настоящей работе такая задача не ставилась. Авторы стремились исключить влияние примыкающих к точке фокуса областей как для формального улучшения локальности измерений, так и для исключения упомянутых артефактов. В предлагаемой схеме естественным пространственным фильтром является входное отверстие оптоволоконного диаметром 50 мкм в приемном канале схемы, где должно располагаться изображение точки фокуса в коллиматоре 2 (см. рис. 1) при оптимальной его юстировке. В пересчете на расстояние до объекта это дает локализацию ~ 2 мм, что подтверждено в экспериментах с газожидкостными струями.

На рис. 2 приводятся данные ЛДА по скорости капель в следе сверхзвуковой струи ($V_{\text{ЛДА}}$) при расходе жидкости $Q = 20$ л/ч на режимах

Рис. 2. Профили скорости капель вдоль оси сверхзвуковой струи при NPR = 4 (1), 6 (2) и расходе жидкости $Q = 20$ л/ч [14].



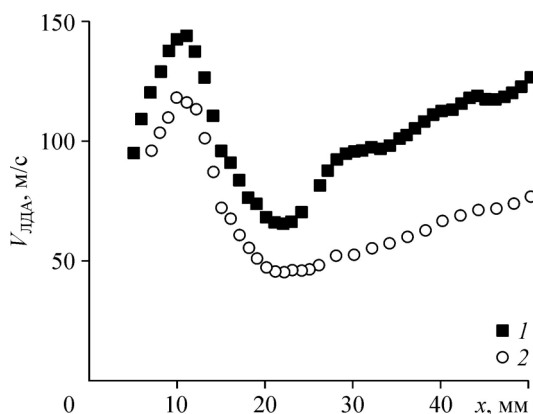


Рис. 3. Профили скорости каплей в ближнем следе сверхзвуковой струи при различных расходах жидкости для $NPR = 6$ [15].

по газу $NPR = 4$ и $NPR = 6$ (NPR — отношение давления в форкамере сопла к наружному давлению). Видно, что на отрезке до 50 мм измерения не демонстрируют гладкого профиля скорости на градиентных участках потока при выбранном шаге измерений. Поэтому на этом отрезке выполнены более детальные измерения скорости с меньшим шагом по координате x . На рис. 3 приведе-

ны результаты измерения скорости спрея в ближнем следе сверхзвуковой газожидкостной струи, полученные данным прототипом с шагом вдоль оси 1–2 мм при расходах жидкости $Q = 180$ л/ч и $Q = 300$ л/ч.

В работах [13, 15] было показано, что расположение основных структур профилей скорости спрея в ближнем следе сверхзвуковой газожидкостной струи хорошо коррелирует с волновой структурой сверхзвуковой недорасширенной струи и градиентными участками скорости газовой фазы. Такая локализация измерений или пространственная избирательность возможна при углах между осями осветительного и приемного коллиматоров, составляющих 30° – 45° (см. рис. 1). При меньших углах, несмотря на повышение спектральной чувствительности схемы, локализация измерений ухудшается из-за более протяженной освещенной области потока, рассеяние из которой попадает в приемный коллиматор.

Заключение

Выполнен анализ существующих подходов к созданию доплеровских анемометров, показана необходимость развития ЛДА с прямым спектральным анализом для исследования высокоскоростных многофазных потоков. Сформулированы требования к современному ЛДА для задач высокоскоростной газодинамики и пути реализации схемы с учетом современного состояния лазерной техники и спектроскопии.

Представлен прототип ЛДА с прямым спектральным анализом на новейшей элементной базе, показаны его основные характеристики и особенности работы в многофазных средах. Продемонстрирована работоспособность прибора на примере исследования скорости каплей в сверхзвуковых газожидкостных струях с высокой концентрацией дисперсной фазы. Предложены варианты схемы и возможности использования прибора в других задачах газодинамики, например, для исследования профиля скорости потока в импульсных трубах.

Авторы выражают благодарность фирме «Angstrom» за предоставленную возможность использования анализатора спектра WS-7 в прототипе ЛДА и полезные консультации.

Список литературы

1. Yeh Y., Cummins H.Z. Localized fluid flow measurements with an He–Ne laser spectrometer // Applied Physics Letters. 1964. Vol. 4. P. 176–178.
2. Albrecht H.-E., Damaschke N., Borys M., Tropea C. Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 722 с.
3. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 304 с.
4. Меледин В.Г. Информационная оптоэлектронная диагностика: наука и инновационные промышленные технологии. Новосибирск: Академиздат, 2015. 142 с.

5. Машек И.Ч. Оптическая спектроскопия сверхвысокого разрешения в лазерной доплеровской диагностике высокоскоростных потоков: дис. ... доктора физ.-мат. наук. 01.04.05. СПб, 2000. 392 с.
6. Алхимов А.П., Бойко В.М., Папырин А.Н., Солоухин Р.И. О диагностике сверхзвуковых двухфазных потоков по рассеянному лазерному излучению // Прикл. механика и технич. физика. 1978. № 2. С. 36–46.
7. Бойко В.М., Папырин А.Н., Поплавский С.В. Быстродействующий лазерный доплеровский измеритель скорости с прямым спектральным анализом // Оптика и спектроскопия. 1980. Т. 48, № 2. С. 356–362.
8. Клишкин В.Ф., Папырин А.Н., Солоухин Р.И. Оптические методы регистрации быстротекущих процессов. Новосибирск: Наука, 1980. 207 с.
9. Малакара Д. Оптический производственный контроль. М.: Машиностроение, 1985. 398 с.
10. Boiko V.M., Poplavski S.V., Nesterov A.U., Kondratev S.V., Morozov A.A., Potekhin A.K. Laser Doppler anemometer based on the Fizeau interferometer // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1893. P. 020015-1–020015-7.
11. Kobtsev S., Kandrushin S., Potekhin A. Long-term frequency stabilization of a continuous-wave tunable laser with the help of a precision wavelengthmeter // Applied Optics. 2007. Vol. 46, No. 23. P. 5840–5843.
12. Boiko V.M., Nesterov A.Yu., Poplavski S.V. Development of LDA method with direct spectral analysis based on Fizeau interferometer for aerophysical experiments // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2027. P. 040008-1–040008-6.
13. Бойко В.М., Нестеров А.Ю., Поплавский С.В. Диспергирование жидкости в высокоскоростных коаксиальных газовых струях // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 3. С. 417–431.
14. Poplavski S.V., Nesterov A.Yu. Investigation of supersonic two-phase flows by a laser Doppler anemometer with a Fizeau interferometer // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2125. P. 030001-1–030001-7.
15. Poplavski S.V., Nesterov A.Yu. On the near wake structure of a supersonic coaxial gas-liquid jet // J. Physics: Conference Series. P. 012038-1–012038-6.

*Статья поступила в редакцию 20 февраля 2020 г.,
после доработки — 5 марта 2020 г.,
принята к публикации 28 апреля 2020 г.*