

## Лазерные доплеровские измерительные системы – прецизионный бесконтактный инструмент в руках ученого и инженера (история создания и применений)

*В.С.Соболев, Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
Новосибирск*

*Все существовавшие (в долазерную эпоху) типы источников света представляли собой устройства, которые радиоинженеры обычно называют генераторами шума, и все тонкие и оригинальные методы оптических измерений имели дело, по существу, с использованием шума. Изобретение лазера сразу же опрокинуло этот барьер. Это позволяет надеяться, что в будущем мы сможем управлять электромагнитными полями, генерируемыми на оптических и более высоких частотах, с той же самой точностью и с тем же разнообразием методов, которые стали обычными в радиотехнике.*

*Р.Глаубер, лауреат Нобелевской премии по физике 2005г.*



Рождение и развитие лазерных доплеровских измерительных систем связано с острейшей проблемой механики середины прошлого века – проблемой гидродинамической турбулентности. Как известно, явления турбулентности ограничивают движения жидкостей и газов в трубопроводах, влияют на скорости самолетов, судов и подводных лодок, и в этом плане потребовались усилия многих научных коллективов, чтобы внести ясность в понимание статистики и механизмов зарождения турбулентности. Об актуальности решения этой проблемы хорошо сказал автор известных фейнмановских лекций по физике: «Однажды нам понадобится рассчитать поток воды, брызжущей из шланга, а мы это не умеем».

В 60-е годы прошлого столетия моя лаборатория в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР в тесном сотрудничестве с коллективами Института гидродинамики СО АН СССР и Института теоретической и прикладной механики СО АН СССР была занята поисками методов исследования турбулентных движений в жидкостях. По аналогии с воздушными потоками, где турбулентность изучалась методами термоанемометрии с чувствительным элементом в виде тонкой нагретой проволоочки, меняющей свое сопротивление под действием набегающего потока, мы пытались применить эту методику к жидкостям. Но проволоочка не выдерживала напора жидкости и рвалась с увеличением скорости. Тогда мы изготовили датчик в виде тонкой металлической пленки, напыленной на клиновидную стеклянную подложку. Это был прорыв, такой датчик заработал, но с крупным недостатком – он сильно искажал исследуемый поток. Мы тщетно пытались найти выход из этого тупика, и вдруг наткнулись на статью известных американских спектроскопистов *Йе* и *Камминса*, которые показали, что когерентное излучение

лазера, рассеянное случайным ансамблем взвешенных в потоке частиц, сохраняет частичную когерентность и несет информацию об их скорости в виде доплеровского смещения частоты исходного излучения.

Работы по использованию этого явления для исследования турбулентности были начаты в 1968 году совместно с лабораторией когерентной оптики ИАиЭ СО АН СССР, возглавлявшейся известным специалистом в области когерентной оптики *В.П.Коронкевичем*, и уже в 1969г. журнал «Автометрия» опубликовал результаты экспериментальных исследований созданного нами первого в СССР лазерного доплеровского измерителя скорости потоков жидкостей (ЛДИС).

Следует отметить, что ЛДИС представляет собой довольно сложный оптикоэлектронный комплекс, состоящий из лазера, формирующей оптики и нетривиальной электроники, выдающей информацию о скорости. В оптической части прибора создаются зондирующие пучки, которые направляются в исследуемую точку потока. Рассеянный взвешенными в потоке микрочастицами свет собирается приемным объективом и подается на катод фотодетектора. Вследствие эффекта Доплера рассеянное излучение от каждого из зондирующих пучков приобретает смещение частоты, определяемое соотношением  $\omega_D = \vec{v}(\vec{k}_s - \vec{k}_i)$ , где  $\vec{k}_s, \vec{k}_i$  – волновые вектора рассеянного и зондирующего пучков соответственно, а  $\vec{v}$  – вектор измеряемой скорости. Эти рассеянные пучки интерферируют между собой, в результате чего на выходе фотоприемника возникает электрический сигнал, частота которого пропорциональна проекции скорости на направление разностного волнового вектора зондирующих пучков. Полученный сигнал по своей природе – процесс случайный и сопровождается достаточно интенсивными шумами. С учетом этого система его электронной обработки включает в себя узлы следящей фильтрации и оптимальной демодуляции.

Отметим, что эта сложность окупается такими неоценимыми, с точки зрения специалистов в области гидро- и аэродинамики, возможностями, как полное отсутствие возмущений исследуемого потока. Введение дополнительных зондирующих лучей позволяет получать информацию обо всех трех компонентах вектора скорости при высоком быстродействии. И ко всем этим преимуществам добавляется еще достаточно высокая точность измерений. Так, например, при времени осреднения 10 мс погрешность измерений может составлять всего 0,1 %.

Наши специалисты методами фурье-оптики проанализировали основные оптические схемы ЛДИС и получили математические модели доплеровского сигнала. На основании этих результатов стало возможным рассчитать и построить оптическую схему ЛДИС, удовлетворяющую всем специфическим требованиям гидроаэродинамического эксперимента. Исследования электрического доплеровского сигнала позволили установить фундаментальное соотношение неопределенности между желаемой точностью измерений и пространственным разрешением: чем выше желаемая точность, тем худшим будет пространственное разрешение. На основании анализа статистических характеристик получаемого сигнала определена потенциальная точность ЛДИС и построены алгоритмы оптимальных оценок скорости по критерию достижения максимума функции правдоподобия.

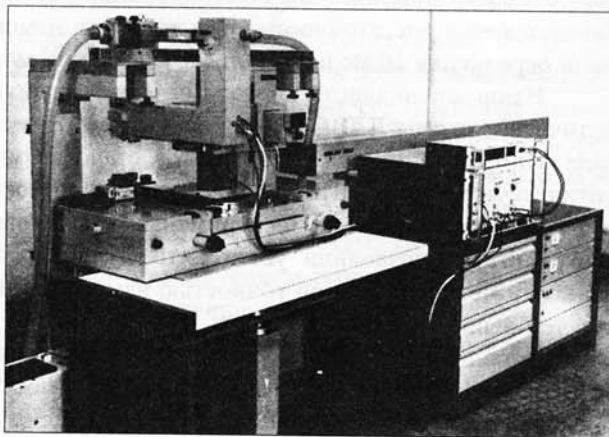
Уже в 1975 году нами была издана монография, посвященная доплеровской



*Группа немецких специалистов известной фирмы «Карл Цейс Йена» и сотрудников ИАиЭ СО РАН в Академгородке после обсуждения проекта создания коммерческого ЛДИС (1977 г.). Слева направо: Ф.Бауман, В.П.Коронкевич, Н.Файстауэр, В.С.Соболев, В.Криг, А.И.Жилевский.*

анемометрии. Как выяснилось позже, она стала «первой ласточкой» в этой области не только в СССР, но и в мире, и только через год в свет вышло сразу несколько книг зарубежных авторов по этой тематике.

Наши результаты вызвали интерес как в СССР, так и за рубежом. Государственный оптический институт (Ленинград) предложил сотрудничество в области исследования турбулентности Мирового океана, а известная немецкая фирма «Карл Цейс Йена» - контракт на совместную разработку ЛДИС для научных исследований. В результате в 1980 году на Международной Лейпцигской ярмарке был продемонстрирован универсальный лазерный доплеровский измеритель скорости ЛАДО-1 (рис.1), кото-



*Рис.1 Лазерный доплеровский анемометр ЛАДО-1.*

рый произвел сильное впечатление на Западе. Дело в том, что, в отличие от имеющихся на рынке полулабораторных образцов ЛДИС, он представлял собой рабочее место исследователя-гидродинамика со всеми компонентами необходимого сервиса. Вскоре появилась и его следующая двухкомпонентная модификация ЛАДО-2 (рис.2).

Несмотря на определенные успехи, директор ИАиЭ академик *Ю.Е.Нестерихин* постоянно упрекал нас в том, что мы, по его выражению, «точим топор, но не рубим». По его инициативе в Институте была сформирована группа с заданием разобраться с основным неясным вопросом: как и каким образом зарождается турбулентность? Дело в том, что к этому времени (1976-1982гг.) теоретические основы развитой турбулентности были уже построены, и именно проблема зарождения турбулентных флуктуаций оставалась «белым пятном». В группу были привлечены физики *В.С.Львов* и *А.А.Предтеченский*, а от наших двух лабораторий в работе принимали участие *В.С.Соболев*, *В.П.Коронкевич*, *Ю.Н.Дубнищев*, *Ю.Г.Василенко*, *Е.Н.Уткин*, *Ф.А.Журавель*, *З.Б.Кругляк*. В качестве объекта исследований было использовано течение Куэтта, которое образуется в зазоре между двумя цилиндрами, когда внутренний цилиндр вращается, а внешний находится в состоянии покоя. Тонкости эксперимента требовали совершенной геометрии цилиндров, отсутствия биений, сверхточного поддержания скорости вращения внутреннего

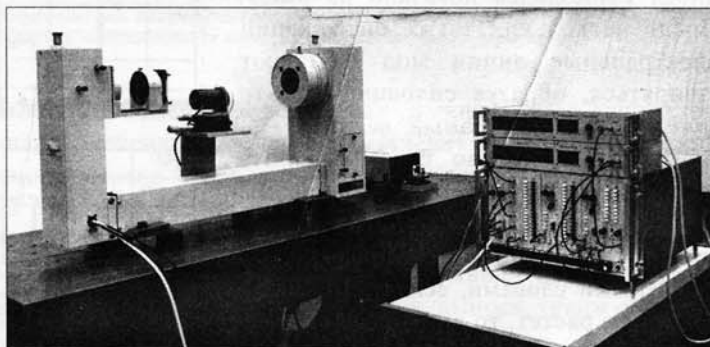


Рис.2 Лазерный доплеровский анемометр ЛАДО-2.

цилиндра. Усилиями выдающегося конструктора *ИАиЭ СО РАН С.А.Кузнецова* стенд был спроектирован и изготовлен (хоть и не без труда) при активном участии начальника мастерских *И.Г.Митюхина*. Началась его наладка совместно с ЛДИС. В отличие от американских ученых, которые также были заняты аналогичными исследованиями, мы пустили пучки вдоль цилиндров, увеличив зазор между ними и тем самым, расширив зону перехода к турбулентности по диапазону скоростей, что позволило, как выяснилось позже, более детально исследовать процесс ее зарождения.

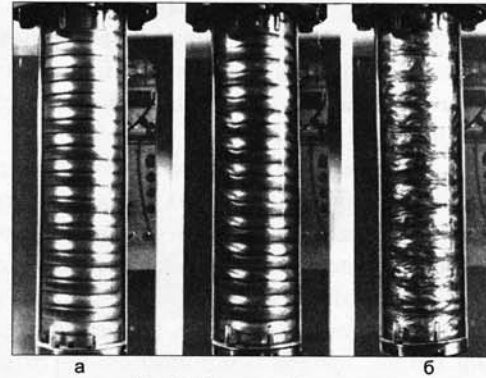
Выходной сигнал ЛДИС через АЦП и интерфейс был введен в память ЭВМ «Минск-32». Таким образом, открылась возможность осуществить статистические исследования флуктуаций скорости потока между цилиндрами.

В этот период существовали две гипотезы возникновения турбулентности. Первая принадлежала *Л.Д.Ландау* и заключалась в том, что турбулентность возникает как бесконечная цепочка бифуркаций мод течения с несоизмеримыми частотами колебаний. Хотя при такой ситуации функция корреляции не должна идти к нулю с ростом задержки, тем не менее, возврат к максимуму должен происходить через очень большие задержки по времени. И такая гипотеза казалась вполне правдоподобной. Вторая, более поздняя, связана с явлениями так называемого

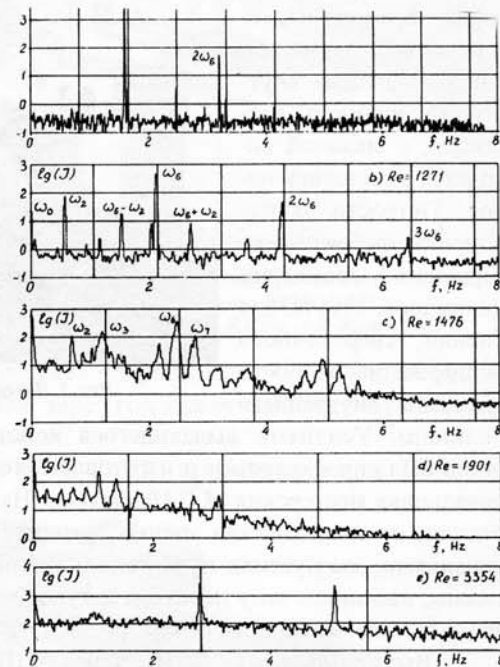
«странного аттрактора», т.е. такого фазового портрета движения, когда несколько возбужденных мод образуют в фазовом пространстве подобие многомерного случайного тора.

Вначале мы исследовали эволюцию спектральных плотностей флуктуаций скорости в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Оказалось, что с ростом этого числа сначала возникает одна колебательная мода и ее гармоники. Затем возникает новая колебательная мода на не соизмеримой с первой частоте и ее гармоники. Визуализированное течение Куэтта для трех чисел Рейнольдса показано на *рис.3*. После нескольких таких бифуркаций спектральные линии мод начинают уширяться, образуя сплошной спектр (*рис.4*). Это был самый важный момент. Теперь нужно было выяснить причины и природу этого уширения. Путем совместного анализа амплитуд мы выяснили, что они антикоррелируют. Иными словами, если энергия одной моды растет, то амплитуды других падают. Эти переходы энергии возникают в тот момент, когда условия существования каждой моды равновероятны и между ними возникает конкуренция. В результате был сделан вывод о том, что турбулентность сначала развивается в соответствии с гипотезой Ландау, но затем (вследствие конкуренции мод) происходит уширение их спектральных линий, и спектр флуктуаций становится сплошным, что характерно для развитой турбулентности. Таким образом, с помощью ЛДИС была решена фундаментальная задача – выявлен механизм зарождения гидродинамической турбулентности. Следует отметить, что американцы не смогли детально исследовать все стадии перехода к турбулентности, поскольку зазор между цилиндрами в их эксперименте оказался слишком узким, и переход к турбулентности осуществлялся «скачком».

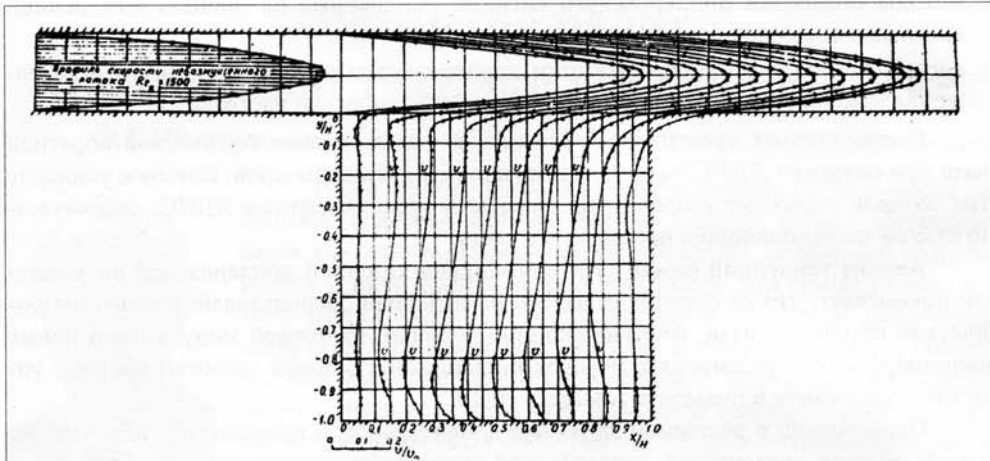
Полученные в ИАиЭ СО АН СССР результаты были доложены на межинститутском семинаре (1980г.), на котором присутствовало большинство «турбулент-



**Рис.3 Течение Куэтта:**  
а – вихри Тэйлора, первая колебательная мода,  
б – переход к турбулентному течению.



**Рис.4 Эволюция формы спектральных линий течения Куэтта с ростом числа Рейнольдса.**



**Рис.5** Течение в траншее.

Эксперимент показал недопустимость захоронения вредных отходов в глубоких впадинах океана, так как при наличии поверхностных течений происходит их вымывание.

щиков» Сибирского отделения Академии наук. Мнение семинара было единодушным – сделан важный шаг в решении проблемы зарождения гидродинамической турбулентности. С помощью нашего ЛДИС совместно с учеными Института теплофизики СО АН СССР было осуществлено исследование течения в траншее (рис.5). Этот эксперимент показал недопустимость захоронения вредных отходов в глубоких впадинах мирового океана, т.к. в них под воздействием поверхностных течений образуется вихрь, поднимающий слои воды со дна, вынося, таким образом, хранимые там вещества.

Следующим шагом в развитии доплеровских систем стала их модификация для целей измерения скорости твердых диффузно рассеивающих тел. В первую очередь это касается таких объектов, как горячий прокат или раскаленные трубы на выходе редуционных станов в трубопрокатных цехах, так как никакими другими методами оценить их скорость с необходимой точностью невозможно.

В 1977 году наш коллектив в рамках помощи новосибирской промышленности разработал, изготовил и запустил новый лазерный доплеровский измеритель на Металлургическом заводе им. Кузьмина. Использование этого прибора существенно снизило брак в трубопрокатном цехе, т.к. он позволил оператору редуционного стана регулировать режим его работы. Кроме того, уменьшились отходы металла, т.к. операция резки труб стала на порядок более точной.

Хотя основные идеи лазерной доплеровской анемометрии хорошо разработаны и известны, эта доплеровская методика продолжает успешно развиваться, о чем свидетельствуют многочисленные публикации и международные конференции, такие, например, как «Оптические методы исследования потоков», организуемые Московским энергетическим институтом и СО РАН с периодичностью один раз в два года. Среди новейших направлений развития ЛДИС можно отметить:

- доплеровскую визуализацию и количественную оценку поля скоростей;

- методы обработки доплеровского сигнала, основанные на оценках мгновенной частоты и следящей фильтрации;
- алгоритмы высокоточной обработки доплеровского сигнала по критерию достижения максимума функции правдоподобия доплеровской частоты.

Особо следует упомянуть возможность использования оптической обратной связи при создании ЛДИС на основе полупроводниковых лазеров. Большое усиление этих лазеров позволяет разработать простые и малогабаритные ЛДИС, сверхчувствительные по отношению к рассеянному свету.

Анализ тенденций развития и применения лазерной доплеровской анемометрии показывает, что ее потенциал далеко не исчерпан. Использование эффектов оптической обратной связи, световолоконной техники, частотной модуляции и новых (например, авторегрессионных методов оценки доплеровской частоты) обещает упростить, удешевить и повысить точность ЛДИС.

Параллельно с решением задач фундаментальной и прикладной гидроаэродинамики область применений доплеровской анемометрии интенсивно расширяется в таких направлениях, как биофизика и медицина, диагностика энергетического оборудования и АСУТП. С ее помощью уже в настоящее время успешно оцениваются параметры кровообращения, проводится диагностика сахарного диабета и глазных заболеваний. В сочетании с бурно развивающейся лазерной томографией тканей человека доплеровская анемометрия позволяет получать количественную информацию о микроциркуляции крови.