

Регистрация оптических сигналов происходит в режиме счета фотонов, для обработки использован метод цифрового синхронного детектирования. Электрические импульсы, снимаемые с фотоумножителей при регистрации отдельных фотонов, после усиления подаются на два идентичных реверсивных счетчика (один — измерительный канал, другой — опорный). Зондирующий лазерный пучок модулируется прерывателем. Когда пучок открывается, по сигналу с фотодиода ФДЗ оба счетчика начинают накапливать информацию по каждому из каналов: регистрируется рассеянное излучение плюс фоновая засветка. Когда луч перекрыт, в счетчиках происходит вычитание фоновой засветки. При достижении наперед заданного числа импульсов в опорном канале и окончании интервала, когда пучок перекрыт, счет прекращается и результаты высвечиваются на двух световых табло.

Выход информации обеспечивается в цифровом виде, что дает возможность подключить ЛДА к ЭВМ. Контроль и управление лазерным доплеровским анемометром осуществляются дистанционно (расстояние от места установки прибора до места сбора информации ~ 100 м).

Описанная система регистрации была опробована в условиях действующей установки У-25. Измерялась мощность фонового излучения плазмы. Измеренная мощность, приведенная к плотности интенсивности абсолютно черного тела (см. рис. 1), оказалась равной $(1-6) \cdot 10^{-7}$ см². Согласно сделанным ранее оценкам, этому значению соответствует объемная концентрация частиц $\sim 10^{-7}$. Если диаметр частиц положить равным 5 мкм, то их концентрация составит 10^3 см⁻³.

ЛИТЕРАТУРА

1. Self S. A. Laser Doppler Anemometer for Boundary Layers.— Proc. 14-th Symp. on Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics, Tullahoma. Tennessee, April, 1974, p. V 8.
2. Rankin R. R., Self S. A., Eustis R. H. A Study of the MHD-Insulating Wall Boundary Layer.— In: Proc. 16-th Symp. on Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics, Pittsburg. Pennsylvania, May 16—18, 1977, p. VI 3.13.
3. Селф С. А., Крюгер К. Х. Методы диагностики течений продуктов сгорания в МГД-каналах.— РТК, 1978, № 5.
4. Кириллин В. А., Шейнцлин А. Е. Некоторые итоги исследования энергетической МГД-установки У-25.— ТВТ, 1974, т. 12, № 2.
5. Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами.— М.: ИЛ, 1961.
6. Кульбин В. М., Ринкевичюс Б. С. Применение аргонового лазера для исследования скорости в пламенах.— ТВТ, 1973, т. 11, № 3.

Поступила в редакцию 26 января 1981 г.

УДК 621.378.525.532.57

П. Я. БЕЛОУСОВ, Ю. Н. ДУБНИЦЕВ, А. Р. ЕВСЕЕВ

(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА МНОГОКАНАЛЬНЫМ ЛАЗЕРНЫМ АНЕМОМЕТРОМ

Экспериментальные исследования структуры турбулентных потоков показали наличие флуктуаций скорости, которые не носят случайного (турбулентного) характера, а связаны с обтеканием и взаимодействием крупномасштабных вихревых структур, называемых когерентными [1—3]. Наиболее информативным методом исследования таких структур является регистрация в опытах мгновенного профиля скорости с последующим анализом на ЭВМ. В статье описывается метод измерения мгновенного

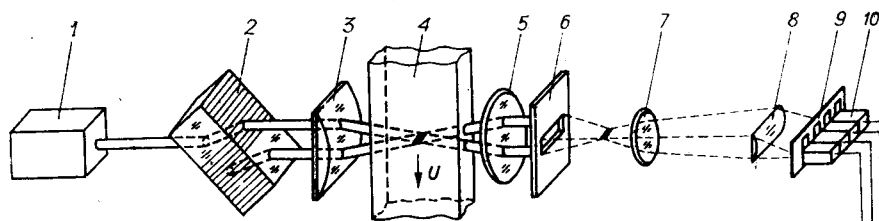


Рис. 1.

профиля скорости потока с применением многоканального лазерного анемометра и обсуждаются некоторые результаты исследования ламинарно-турбулентного перехода в трубе.

Исследование характеристик ламинарно-турбулентного перехода проводилось в вертикальной трубе прямоугольного сечения 10×40 мм². Многоканальным лазерным анемометром измерялся мгновенный профиль скорости в четырех точках потока в плоскости симметрии трубы. Оптическая схема многоканального ЛДИС и параметры гидростенда гравитационного действия описаны в [4].

Режим работы оптической схемы дифференциальный (рис. 1). Схема содержит: лазер 1, расщепитель 2, цилиндрический объектив 3, гидродинамический канал 4, приемный объектив 5, апертурную диафрагму 6, объектив 7, цилиндрическую линзу 8, полевую диафрагму 9 и блок фотоприемников 10. С помощью цилиндрической системы в исследуемой области потока формируется интерференционное поле, пространственно ограниченное поверхностью трехосного эллипсоида с заданным размером осей и ориентацией в пространстве. Блоки приемной оптики (элементы 5 и 7) представляют собой микроскоп, в котором изображение интерференционного поля формируется в рассеянном свете в плоскости фотоприемников с заданным увеличением. Пространственное разрешение и геометрия зондирующего объема определяются проекциями полевых диафрагм 9. В исследуемой области зондирующий объем разбивается на пространственно разнесенные зоны, число которых равно числу каналов фотоприемного устройства с соответствующими полевыми диафрагмами. Характерные пространственные размеры этих зон, по которым усредняются результаты измерений в каналах, составляют $0,01 \times 0,1 \times 1,0$ мм. Расстояние между точками, соответствующими центрам зон, можно изменять от 0,04 до 3,0 мм.

Измерения локальных скоростей потока осуществлялись путем выделения доплеровского сдвига частоты в свете, рассеянном в исследуемой области потока. Доплеровские сигналы с фотоприемников 10 поступали на фильтры верхних и нижних частот 11. Далее доплеровские сигналы по двум каналам после усилителей 12 записывались на многоканальный магнитофон 14 фирмы «Шлюмберже» (Франция). Два других доплеровских сигнала обрабатывались двухканальным процессором 13 частотно-следящего типа [5]. Аналоговые напряжения, пропорциональные мгновенным скоростям потока, с выхода 13 записывались на магнитофон 14 синхронно с двумя предыдущими доплеровскими сигналами. На следующем этапе воспроизводимые с магнитофона доплеровские сигналы обрабатывались процессором 13 и снова записывались на свободные дорожки магнитофона без нарушения синхронности. Таким образом, на магнитофоне оказываются записанными четыре синхронных аналоговых напряжения, пропорциональных мгновенным скоростям потока в соответствующих точках. Дальнейшая обработка сигналов осуществлялась на специализированной ЭВМ типа «Хистомат» фирмы «Интертехника». Следует отметить, что пространственное разрешение в каждом канале ограничивается мощностью излучения лазера и чувствительностью приемника, а количество точек регистрации мгновенного профиля скорости — соот-

ветствующим числом каналов магнитофона или процессора.

На рис. 2 изображены профили средней скорости для различных режимов течения в трубе. Параболический профиль 1 соответствует ламинарному режиму течения при числе Рейнольдса 440. Экспериментальные точки 3 хорошо соответствуют степенному профилю $1/7$ (сплошная линия) для турбулентного режима течения в ядре потока и степенному профилю $1/6$ для пристенной зоны течения при числе Рейнольдса 10 800.

Переход от ламинарного режима течения к турбулентному наблюдается при числе Рейнольдса 4050. Профиль 2 имеет точку перегиба, что, как известно, свидетельствует о неустойчивости течения. Числа Рейнольдса рассчитаны по расходной скорости, высоте канала ($2h = 10$ мм) и кинематической вязкости жидкости. Все измерения проведены в сечении, расположенном на расстоянии 75 калибров от входа в трубу. Степень турбулентности потока в трубе по нашим оценкам составляла 1%. Все последующие многоканальные измерения проведены при числе Рейнольдса 4100, при котором уже наблюдалось турбулентное течение (перемежаемость $\approx 100\%$) по всему сечению трубы. В указанных условиях течение еще более сложно, чем развитый турбулентный поток.

На рис. 3 изображена типичная картина пространственно-временного распределения пульсаций скорости в потоке. Время между соседними кадрами (слева направо) составляет 2 мс. По оси абсцисс каждого кадра отложена относительная величина пульсаций скорости $\varepsilon = (U - \bar{U})/\bar{U}$ со своим знаком, где U, \bar{U} — мгновенное и среднее (по времени) значения скорости потока соответственно; по оси ординат — пространственное положение точек измерения, отсчитываемое от оси симметрии трубы. Точки измерения располагались в пространстве равномерно с шагом 0,8 мм. Представленные распределения показывают сложность изучаемого явления. Для анализа рассматривалась последовательность событий, состоящая из 1000 кадров, зафиксированных с шагом в 2 мс. Среди рассмотренных событий обращают на себя внимание кадры типа 2—7 (от-

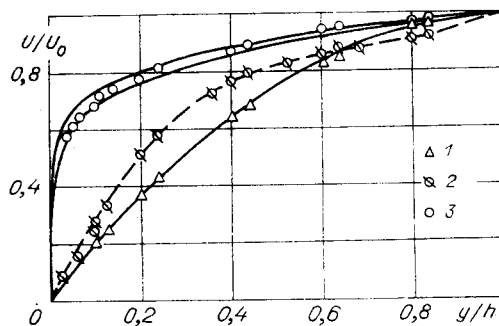


Рис. 2.

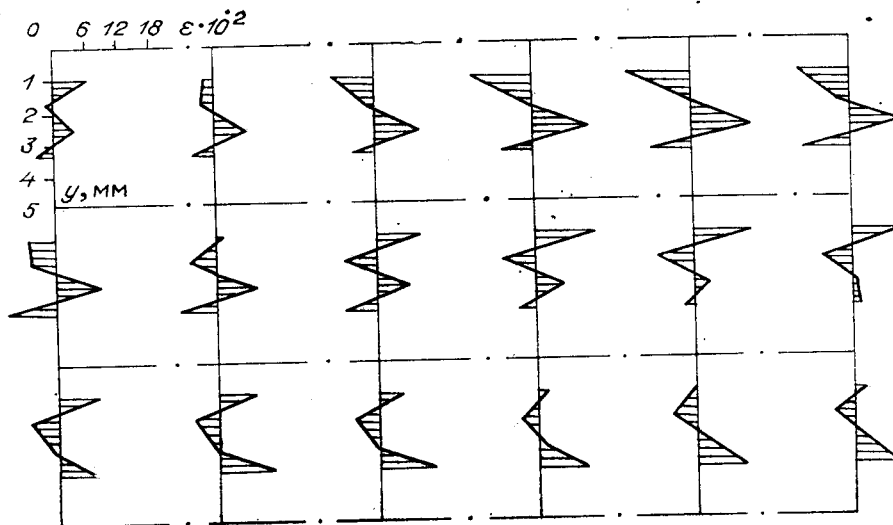


Рис. 3.

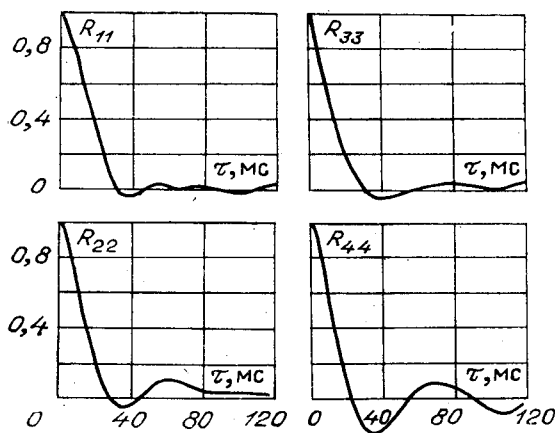


Рис. 4.

пространственно-временным координатам соответствует в потоке крупномасштабным вихревым структурам. Оценки пространственных масштабов вихревых структур дают следующие значения: поперек потока $\sim h$ и вдоль по потоку $(1-3)h$. Следует отметить, что средняя интенсивность пульсаций скорости в вихревом распределении вблизи оси и в пристенной зоне имеет порядок $0,08-0,1$. Фазы ускорения и замедления потока по всему сечению наблюдаются с частотой 4 Гц. В районе указанных фаз амплитуда пульсаций скорости достигает максимальных значений порядка $\epsilon \approx 0,2-0,25$. Отметим и такой факт, что при смещении всей области, размер которой $h/2$, к оси потока или в пристенную область резко сокращается доля во времени вихревого пространственно-временного распределения до $5-10\%$. Диапазон частот пульсаций скорости при анализе ограничивался фильтром нижних частот до 100 Гц.

На рис. 4 представлены автокорреляционные функции продольных пульсаций скорости при следующей геометрии исследуемой области: точка 1 — $\bar{y} = 0,04$, 2 — $\bar{y} = 0,2$, 3 — $\bar{y} = 0,36$ и 4 — $\bar{y} = 0,52$. Автокорреляционные функции имеют обычный для турбулентного режима течения вид, хотя из аналоговых сигналов фильтром нижних частот выделялись колебания с частотой не только до 10 Гц, но и до 100 Гц. Автокорреляционные функции определялись по 128 точкам через 2 мс.

На рис. 5 изображены пространственные корреляционные функции. Сигнал, номер которого указан последним, задерживался относительно первого сигнала. Геометрия расположения точек измерения прежняя (см. рис. 3). Корреляционные функции определялись по 128 точкам через 2 мс при диапазоне частот пульсаций до 10 Гц. Отметим распространение возмущений от оси канала и затухание на уровне $\bar{y} \approx 0,5$, что весьма близко к уровню нулевых пульсаций крупномасштабных вихревых структур.

На рис. 6 представлены спектральные характеристики пульсаций скорости в полосе частот до 100 Гц. Пространственное положение точек измерения соответствует данным рис. 4: 1 — $\bar{y} = 0,2$; 2 — $\bar{y} = 0,36$; 3 — $\bar{y} = 0,52$; 4 — $\bar{y} = 0,68$. Из графиков следует, что спектры пульсаций скорости на разных расстояниях от стенки трубы существенно отличаются по интенсивности. В точках 2 и 3, наиболее близких к уровню нулевых

счет кадров слева направо) с неслучайным, на наш взгляд, пространственно-временным распределением пульсаций скорости, аналогичных распределению пульсаций в теле вихря. Нулевой уровень пульсаций расположен при $\bar{y} = y/h \approx 0,4$. Вихри с вращением против часовой стрелки составляют $2/3$ от их общего числа, а суммарное вихревое распределение пульсаций скорости — 40% от всего времени наблюдения. Можно предположить, что указанное распределение пульсаций скорости по про-

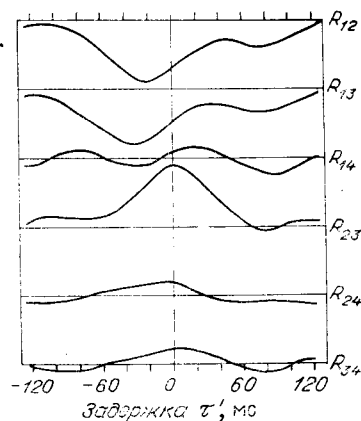


Рис. 5.

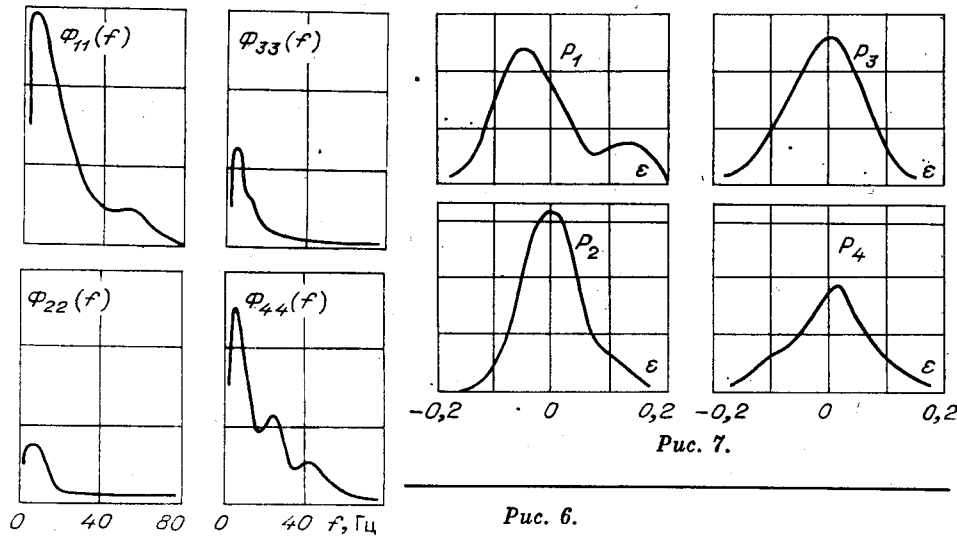


Рис. 6.

пульсаций крупномасштабных вихревых структур, спектры соответствуют минимальной интенсивности пульсаций. На графике по оси абсцисс отложена частота, а по оси ординат — средний квадрат пульсаций в полосе 4 Гц.

На рис. 7 даны плотности вероятности пульсаций скорости, соответствующие пространственному распределению точек измерения на рис. 6. Здесь по оси абсцисс отложена относительная величина пульсаций скорости ε , а по оси ординат — вероятность пульсаций. Для точек в диапазоне $\bar{y} \approx 0 \div 0,3$ наблюдается двугорбое распределение вероятности пульсаций. На расстояниях $\bar{y} \approx 0,3 \div 0,6$ распределение вероятности пульсаций близко к нормальному. При приближении к обтекаемой стенке ($\bar{y} > 0,6$) становится более выраженной область положительных пульсаций скорости.

В зоне ламинарно-турбулентного перехода, как известно, формируется новый механизм обмена количеством движения между слоями в движущейся жидкости. Сильное перемешивание быстрых слоев жидкости у оси трубы с более медленными пристенными слоями приводит к существенно более плоскому профилю средней скорости в ядре турбулентного потока и к значительному увеличению градиента средней скорости у стенки.

Анализ пространственно-временного распределения пульсаций скорости позволяет сделать предположение, что в зоне ламинарно-турбулентного перехода образуются крупномасштабные вихревые структуры с отношением полуосей 2:1. Наибольший размер $\sim 2h$ ориентирован по потоку. Если это так, то можно предположить, что одной из наиболее характерных черт ламинарно-турбулентного перехода является формирование крупномасштабных вихревых структур, ответственных за сильное перемешивание жидкости в ядре потока. При вынужденном ламинарно-турбулентном переходе, например, под действием струйки, впрыскиваемой через обтекаемую стенку, образуются крупномасштабные вихревые структуры, вытянутые по потоку, с отношением полуосей 2:1. Такой результат зафиксирован и при течении в трубе, и при обтекании пластины [6].

Особенностями крупномасштабных вихревых структур можно объяснить некоторые свойства корреляционных, спектральных и вероятностных характеристик пульсаций скорости потока. Уровень нулевых пульсаций крупных вихрей приходится на $\bar{y} \approx 0,4$. Спектральные измерения показывают, что интенсивность пульсаций скорости в указанной зоне минимальна, а вероятностные характеристики близки к нормальным. Наи-

большая активность потока наблюдается вблизи оси, что подтверждается как спектральными, так и вероятностными распределениями пульсаций. Несколько меньшая активность перемешивания наблюдается в пристенной зоне, что обусловлено, по-видимому, влиянием вязкости среды. Оценки наибольшего масштаба вихревых структур, определенные по автокорреляционной функции и по пространственно-временному распределению пульсаций скорости, совпадают. Поскольку в пространственно-временном распределении пульсаций скорости наблюдаются крупномасштабные вихревые структуры с вращением как по потоку ($1/3$), так и против потока ($2/3$), автокорреляционные функции, осредненные за значительный промежуток времени, не имеют явно выраженных многократных пересечений нулевого уровня.

Рассмотренные крупномасштабные вихревые распределения пульсаций скорости позволяют сделать вывод о существенном вкладе крупномасштабных когерентных структур в формирование турбулентного механизма обмена количеством движения между слоями в зоне ламинарно-турбулентного перехода в трубе.

В плане дальнейших работ следует предусмотреть распространение измерений на все исследуемое сечение потока в трубе с увеличением количества измерительных каналов. Многоканальные измерения мгновенного профиля скорости потока следует провести и при развитом турбулентном режиме течения.

Авторы приносят глубокую благодарность В. А. Костомахе за помощь при обработке экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. O. A. L. Davies, Yule A. J. Coherent Structures in Turbulence.— J. Fluid Mech., 1975, vol. 69, p. 3.
2. Абрамович Г. Н. Влияние крупных вихрей на структуру турбулентных течений со сдвигом.— МЖГ, 1979, № 5.
3. Заккей В., Барра В., Уонг К. Р. Природа турбулентности в пограничном слое при высоких дозвуковых скоростях.— РТК, 1979, т. 17, № 4.
4. Белоусов П. Я., Евсеев А. Р. Многоканальный лазерный доплеровский измеритель скорости.— В кн.: Исследования по управлению пограничным слоем. Новосибирск: изд. ИТ СО АН СССР, 1976.
5. Лазерные доплеровские измерители скорости.— Новосибирск: Наука, 1975.
6. Wygnauski I., Socolov M., Friedman D. On Transition in a Pipe.— J. Fluid Mech., 1975, vol. 69, p. 283—304.

Поступила в редакцию 27 августа 1981 г.

УДК 532.574.082

**В. И. ВОЛКОВ, В. А. МУХИН, В. И. ТИТКОВ,
Я. Я. ТОМСОНС**
(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ

Для расчета тепломассообмена в неподвижном зернистом слое необходимо знание локального поля скоростей внутри пористой среды. Известно лишь несколько работ по контактным измерениям внутри зернистого слоя [1—3]. В этих работах использовались термоанемометрические, электродиффузионные датчики скорости. Недостатки контактной методики известны: это искажение структуры пористой среды и потока, зависимость показаний датчиков от расстояния до твердой поверхности пористой среды или стенки канала. Поэтому данные, полученные с по-