

В. К. АЛАТОРЦЕВ, И. А. БЕЛОВ, А. М. ЖАК,
А. В. САПЛИН, В. В. СКВОРЦОВ
(Москва)

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДА ЛДИС В АВТОМАТИЧЕСКОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

В работе рассмотрены вопросы применения информационно-измерительной системы с использованием ЛДИС в автоматическом аэродинамическом эксперименте по исследованию характеристик дозвукового эжектора. Эта система позволяла вести адаптирующийся эксперимент и обрабатывать результаты измерений текущих значений скоростей в темпе эксперимента.

Структурная схема автоматической системы ЛДИС показана на рис. 1. В состав схемы входят цифровой анализатор сигнала ЛДИС 1, анализатор временных параметров 2 и микро-ЭВМ 3, соединенная с системой посредством интерфейса связи 4. Лазерное излучение, рассеянное на частицах естественной запыленности потока, собиралось приемной оптикой ФЭУ 5 и преобразовывалось в электрический сигнал. Электронная аппаратура ЛДИС работала по принципу дискретного измерения частоты сигнала. Вначале сигнал фильтровался в анализаторе 1 полосовым фильтром с целью подавления низкочастотной составляющей и сопутствующих внеполосных шумов. Далее отфильтрованный сигнал подавался на пороговую схему, которая формировала временной интервал, соответствующий длительности измеряемого сигнала на некотором амплитудном уровне, и пачку видеоимпульсов, число которых соответствовало числу периодов сигнала, попавших в сформированный временной интервал. Анализатор временных параметров ЛДИС (АВП ЛДИС) 2 измерял длительность сформированного временного интервала (с точностью $\pm 10^{-9}$ с) и число видеоимпульсов в пачке. АВП ЛДИС выполнял также функцию селекции результатов измерений по числу периодов для достижения заданной точности единичного измерения. Далее информация о сигнале поступала на интерфейс связи 4 с микро-ЭВМ 3 и пересылалась в ее процессор. Микро-ЭВМ обрабатывала поступающую информацию в реальном масштабе времени. Если в первичном массиве количество точек оказывалось недостаточным для достижения заданной точности измерения, то проводился набор дополнительного массива точек. Величину дополнительного массива микро-ЭВМ определяла в реальном масштабе времени, исходя из полученной дисперсии результатов в первичном массиве. При достижении заданной точности измерения микро-ЭВМ давала команду на перевод координатного устройства 6 в новую точку измерения.

Аппаратурная погрешность измерений, обусловленная анализатором сигнала ЛДИС совместно с АВП ЛДИС, составляла $\sim 0,05\%$. Аттестация аппаратуры осуществлялась с помощью имитатора доплеровского сигнала [1].

Для нахождения необходимого числа измерений, реализующих заданную точность определения средней скорости, надо знать [2] спектральную мощность пульсаций скорости газового потока и плотность распределения пауз между отсчетами. В случае экспоненциального распределения пауз (со средним τ) и спектральной плотности $s(\omega) = \sigma^2 / [\alpha [1 + (\omega/\alpha)^2]]$ дисперсия выбо-

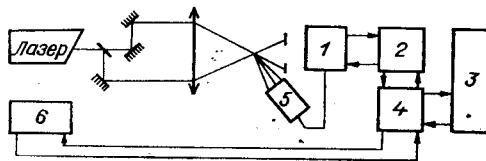


Рис. 1.

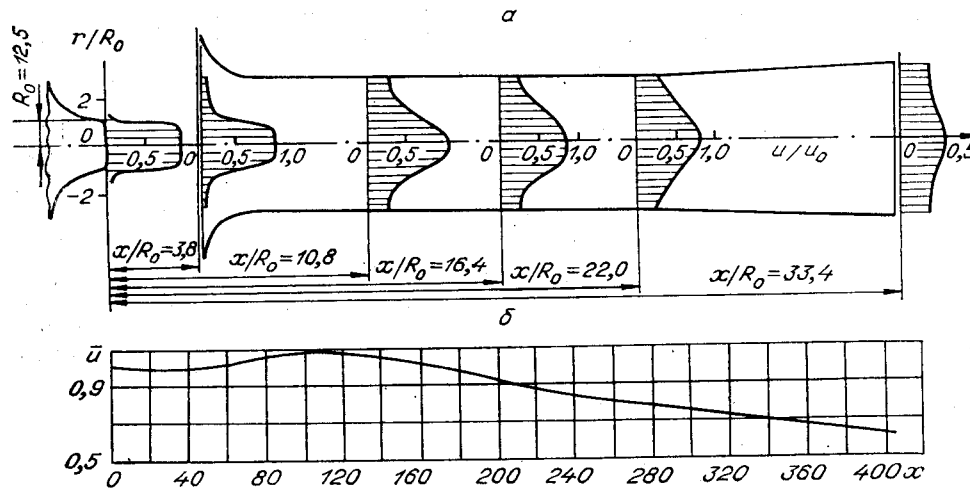


Рис. 2.

точного среднего на основании результатов работ [2, 3] записывается как $D_{\bar{v}_N} = (\sigma^2/N) f(x_0, N)$, где $x_0 = \alpha\tau$, N — число измерений, а множитель $f(x_0, N)$ можно представить в виде

$$f(x_0, N) = 1 + (2/x_0) - (2/x_0^2 N) - (2/x_0 N) + (2/x_0^2 N) (1/(1+x_0))^{N-1}.$$

Для реального эксперимента такая аппроксимация спектральной плотности, по-видимому, применима, так как убывание спектральной плотности пульсаций скорости на больших частотах круче, чем в законе « $-5/3$ » реальных потоков [4]. Это приводит только к увеличению дисперсии определения выборочного среднего, так как при этом вероятность появления пульсаций с низкой частотой увеличивается. Близость функции распределения пауз между отсчетами к экспоненциальному закону показана в работе [5]. Поэтому можно считать, что рассматриваемый пример дает оценку максимальной дисперсии выборочного среднего значения скорости потока в данном случае. При минимально возможном в данном эксперименте параметре $x_0 = 2$ функция $f(x_0, N) \leq 2$.

Таким образом, для оценок дисперсии выборочного среднего значения скорости газового потока в данных экспериментах можно было использовать оценку дисперсии $D_{\bar{v}_N} = 2\sigma^2/N$, что позволило упростить алгоритм выбора необходимого количества отсчетов и уменьшить требуемое время регистрации.

Реализованная информационно-измерительная система применялась для исследования характеристик потока в осесимметричном эжекторе. Основные геометрические параметры эжектора приведены на рис. 2, а. Он состоял из высоконапорного тракта со сменной насадкой на выходе и камеры смешения, цилиндрическая часть которой набиралась из сменных колец, а диффузор имел угол раскрытия $\alpha_0 \sim 4^\circ$. Длина цилиндрической части камеры смешения могла изменяться за счет различного набора колец вплоть до максимальной — 235 мм. Особенность конструкции эжектора в том, что в одном кольце имелось два окна, выполненных из оптического стекла, для ввода и вывода лазерного излучения. Это позволило с помощью различного сочетания колец провести измерения поля скоростей по всей длине внутренней полости цилиндрической части камеры смешения. Кроме того, были детально исследованы поля скоростей в зоне предварительного смешения — между соплом и конфузуром камеры смешения, а также на выходе диффузора.

В выполненных экспериментах расстояние между соплом высоконапорного газа и входной кромкой диффузора 52 мм, а длина цилиндри-

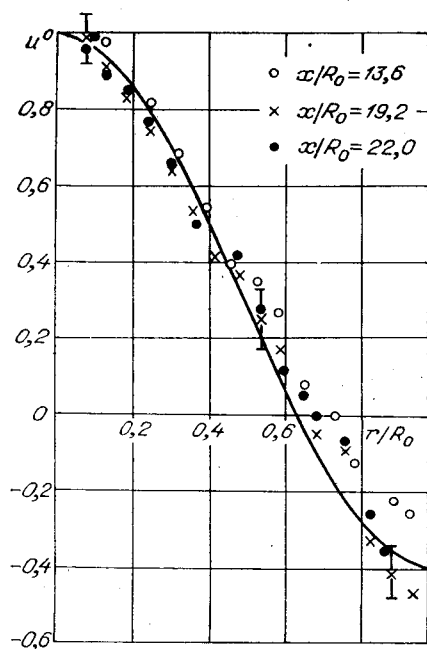


Рис. 3.

ядре достигает максимума $\sim 1,06u_0$ в начале цилиндрической части. Данный эффект обусловлен понижением статического давления на начальном участке камеры смешения. При дальнейшем распространении потока в камере смешения скорость в его ядре начинает убывать, ядро размывается, и в сечении $x/R_0 \geq 19$ эжектирующий и эжектируемый потоки разделить нельзя.

Использование в проведенных экспериментах ЛДИС, в котором реализовалась достаточно высокая точность измерений, позволило получить, наряду с качественными представлениями о течении газа в исследуемом эжекторе, также важные количественные характеристики и провести надежное сравнение с результатами теоретических расчетов. В частности, по данным проведенных экспериментов был определен один из основных параметров этой газовой машины — коэффициент эжекции, который оказался равным 2,6. На рис. 3 приведено сопоставление экспериментальных (точки) и теоретического [6] (сплошная кривая) распределений относительной разности u^0 между значениями местной и средне-массовой скоростей потока по радиусу для нескольких сечений основного участка эжектора. Теоретическая кривая — функция Бесселя $J_0(3,83r/R_0)$ — получена в предположении постоянства статического давления в сечении и малой неравномерности потока. Здесь же отложен 99%-ный доверительный интервал, полученный в приближении нормального распределения оценки u^0 . Эти результаты иллюстрируют перспективность использования ЛДИС в экспериментальных исследованиях проблем внутренней газодинамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нелидкин Л. М. Имитатор сигнала ЛДИСа.— В кн.: Радиоэлектронные устройства: Межвуз. сб. Рязань: изд. Рязанского радиотехнического ин-та, 1977.
2. Гапонов В. А., Томсон Я. Я. Об оценке математического ожидания стационарного случайного процесса при неравномерной дискретизации.— В кн.: Алгоритмы обработки и средства автоматизации теплофизического эксперимента. Новосибирск: изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1978.
3. Daudpota O. T., Dowrick G., Greated C. A. Estimation of Moments of a Poisson-Sampled Random Process.— J. Phys. A. Math. Gen., 1977, vol. 10, N 4, p. 471—483.
4. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика.— М.: Наука, 1967, ч. 2.

ческой части камеры смешения составляла 235 мм. Сечения эжектора, в которых проводились измерения, показаны на рис. 2, а. Скорость потока на выходе из сопла u_0 поддерживалась равной 70 м/с. Результаты измерений приведены на рис. 2, б, причем $\bar{u} = u/u_0$. Значение скорости u_0 уточнялось перед и после каждой серии измерений профиля скорости в том или ином сечении. Полученные экспериментальные результаты согласуются с известными представлениями о характере течения газа в эжекторе (см., например, [6]). Течение характеризуется четко выраженным потенциальным ядром, которое по мере удаления от сопла постепенно размывается из-за увеличения толщины струйного пограничного слоя. Скорость истекающего из сопла потока в ядре сохраняется постоянной, но у самого среза конфузора намечается ее увеличение.

Ускорение потока продолжается в камере смешения, причем скорость в

5. Пахомушкина Н. В., Семейкин Н. П., Филь В. А. Информационные характеристики сигнала ЛДИС.— В кн.: Материалы II Всесоюз. конф. по методам аэрофизических исследований. Оптические методы исследований газового потока. Минск: изд. Ин-та тепло- и массообмена АН БССР, 1979.
6. Гродзовский Г. Л. Выравнивание неравномерности поля скоростей в осесимметричном турбулентном и ламинарном потоке.— ДАН, 1954, т. XCVII, № 4.

*Поступила в редакцию 22 декабря 1980 г.;
окончательный вариант — 7 декабря 1981 г.*

УДК 53.082.5 : 578.088.5

М. В. ЕВДОКИМОВ, А. В. ПРИЕЗЖЕВ, Ю. М. РОМАНОВСКИЙ

(Москва)

ЛАЗЕРНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ АНЕМОМЕТР НА ЛИНИИ С ЭВМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕДЛЕННЫХ ПОТОКОВ ПРОТОПЛАЗМЫ В ЖИВЫХ КЛЕТКАХ

В последние годы лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) начинают применяться для изучения явлений, выходящих за рамки традиционной гидродинамики. Например, в ряде работ показана возможность применения ЛДА для исследования направленных потоков крови в микрокапиллярах [1] и направленных потоков протоплазмы в живых клетках [2—4], а также электрофоретической подвижности заряженных микрочастиц [5]. Такие измерения необходимы при выполнении как прикладных, так и фундаментальных исследований в области биофизики подвижности.

В настоящей работе описан автоматизированный комплекс «ЛДА — ЭВМ ЕС-1010», построенный для проведения исследований внутриклеточной подвижности в реальном масштабе времени. Целью этих исследований является изучение механизмов, приводящих протоплазму клеток в движение. Сопряжение ЛДА с ЭВМ является лишь первым шагом в построении измерительно-вычислительной системы для комплексного изучения проблемы внутриклеточной подвижности путем одновременной регистрации целого ряда процессов и параметров, таких, как скорость потока протоплазмы, сократительная активность, мембранный потенциал, и др.

Объекты исследования. В качестве биологических объектов использовались крупные клетки пресноводной водоросли *Nitella* и тяжи недифференцированной многоядерной клетки плазмодия миксомицета *Physarum*. Общий характер движения протоплазмы в этих объектах в стационарных условиях описан в монографии [6] по результатам наблюдений, проведенных методами оптической микроскопии и теневых отпечатков.

Так, в клетках *Nitella*, имеющих размеры несколько сантиметров в длину и около 500 мкм в диаметре, наблюдается ламинарный поток протоплазмы в каналах глубиной ~ 20 мкм, причем большинство частиц движется с одинаковой постоянной скоростью ~ 50—80 мкм/с.

В тяжах плазмодия *Physarum*, представляющих собой вязкоупругие трубки с внутренним диаметром от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров, имеет место осесимметричный реверсивный поток со значительным градиентом скорости по сечению. В моменты наиболее интенсивного течения максимальная по сечению скорость потока достигает 2—3 мм/с. Период изменения направления потока составляет около 100 с.

Особенности объектов с точки зрения применения ЛДА. Применение ЛДА для измерения параметров потока протоплазмы в клетках неизбеж-