

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 532.517.3 : 631.06

Ф. А. ЖУРАВЕЛЬ, М. С. ИСКАКОВ, С. Н. ЛУКАЦУК, А. А. ПРЕДТЕЧЕНСКИЙ
(Новосибирск)

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АЗИМУТАЛЬНЫХ ВОЛН В ТЕЧЕНИИ КУЭТТА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДИФфуЗИОННОЙ МЕТОДИКИ

Введение. Применение идей и методов теории динамических систем к проблеме зарождения турбулентности [1—3] привело в последнее время к возникновению нового направления в гидродинамическом эксперименте [4—6], состоящего в последовательном выделении бифуркаций ламинарного потока жидкости при увеличении числа Рейнольдса и изучении на каждой стадии типа возникающих аттракторов. В рамках такого подхода изучалась эволюция временной зависимости азимутальной компоненты вектора скорости, измерявшейся лазерным доплеровским измерителем (ЛДИС), в круговом течении Куэтта с вращающимся внутренним цилиндром [7—9]. Было показано, что первая бифуркация приводит к развитию азимутальных волн, амплитуды которых при небольшой надкритичности подчиняются закону Ландау и в соседних парах вихрей Тейлора почти одинаковы. Следующие бифуркации в этом течении приводят, по косвенным данным [9], к нарушению пространственной когерентности азимутальных волн и в дальнейшем к развитию медленных стохастических режимов течения.

Однако одноточечный измеритель не позволяет корректно изучить характер разрушения когерентности колебаний течения. Для этого требуется одновременное измерение фазовых переменных в двух и более точках области, заполненной жидкостью. В настоящей работе в качестве фазового параметра выбрано локальное трение на стенках внешнего цилиндра, измеряемое электродиффузионным методом [10, 11]. Метод состоит в использовании в качестве жидкости электролита специального состава и измерении тока через электрод малой площади. Для датчика-электрода с круглым сечением ионный ток в диффузионном режиме пропорционален кубическому корню из модуля градиента скорости (касательного напряжения) на его поверхности. Такая методика дает возможность располагать на поверхности цилиндра большое количество датчиков и тем самым изучать разнообразные пространственные и временные корреляции фазовых переменных.

Цель настоящего эксперимента — изучить возможности электродиффузионного метода применительно к задаче получения многомерного фазового портрета ламинарно-турбулентного перехода. Кроме того, в работе описывается организация программных средств, которые применяются для анализа гидродинамических сигналов.

1. Гидродинамический стенд и методика эксперимента. 1.1. Гидродинамическая установка представляет собой стакан, выполненный в виде кругового цилиндра с внутренним диаметром $d_1 = 55$ мм, внутри которого вращается стержень $d_2 = 35$ мм. Конструкция более подробно опи-

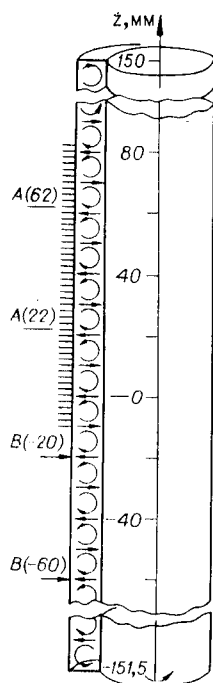


Рис. 1. Схематическое изображение структуры течения и расположение датчиков.

сана в [9]. В отличие от [9] расстояние от дна до верхней неподвижной крышки составляет 301,5 мм, неподвижный внешний цилиндр изготовлен из оргстекла. Это позволяет визуально контролировать количество вихрей Тейлора в установке, просвечивая жидкость световым ножом. Рассеяние света на случайных пылинках достаточно для непосредственного подсчета числа вихрей.

Структура исследуемого течения приведена на рис. 1, где схематически показаны проекции линий тока на изображенное сечение. В качестве рабочей жидкости применяется водный раствор красной кровяной соли (0,01*N*), желтой кровяной соли (0,01*N*) и едкого натра (0,1*N*). Датчики (катоды) изготовлены из платиновой проволоки диаметром 0,1 мм, торцы которой зашлифованы на внутренней поверхности цилиндра. В качестве общего анода используется нижний фланец из нержавеющей стали. Датчики расположены вдоль образующей цилиндра в две линейки по 50 шт. с шагом 2 мм. Если начало координат выбрать в центре, то датчики линейки *A* имеют координаты от -10 до +88 мм, а датчики *B* — от +10 до -88 мм и смещены по азимуту на 45° относительно линейки *A*. Измерения проводились одновременно четырьмя датчиками, которые выбирались либо по максимуму сигнала из разных пар вихрей (например, в точках +62, +22, -20 и -60 мм), либо в одной паре вихрей (например, в точках +58, +60, +62, +64 мм). Для преобразования диффузионного тока в напряжение применялись преобразователи, описанные в [12]. Датчики сохраняли работоспособность в течение трех месяцев без какой-либо механической очистки рабочей поверхности.

1.2. Основной параметр установки — число Рейнольдса — поддерживался с относительной погрешностью порядка $5 \cdot 10^{-4}$. Это обеспечивалось регулированием периода вращения с относительной погрешностью $3 \cdot 10^{-5}$ и температуры жидкости с точностью 0,02 К. Вся установка помещалась в теплоизолирующий бокс, внутри которого расположен вентилятор, снабженный нагревателем и датчиком температуры в виде сетки из медной проволоки. Регулятор температуры обеспечивал указанную точность при перепаде температур между внутренностью бокса и комнатой в 2-3 К. Стабилизация температуры в комнате осуществлялась кондиционером типа БК1500. Температура цилиндров измерялась кварцевым термометром НР2801А с разрешением 0,01 К и абсолютной погрешностью не хуже 0,05 К.

1.3. Течение в изучаемом объеме имеет оптимальное состояние с 30 вихрями Тейлора. Для надежного получения этого состояния число Рейнольдса Re ($Re = \omega d_1(d_2 - d_1)/4\nu$) в области рождения вихрей Тейлора $0,9 Re_c < Re < 1,1 Re_c$ ($Re_c = 74 \pm 2$) изменялось с ускорением $\sim 2 Re/ч$. Дальнейшее увеличение ускорения до 300—500 $Re/ч$ не разрушало полученного состояния. При $Re \sim 1000$ граница между вихрями, соответствующая отходящему от внутреннего цилиндра потоку, начинает изгибаться: возникают азимутальные волны. В области бифуркации, отвечающей появлению азимутальных волн, число Re также изменялось медленно. После фиксирования числа Рейнольдса производился анализ сигналов.

2. Многоканальная система сбора информации. Для сбора и анализа данных применялась система, собранная в стандарте КАМАК на базе терминального комплекса к ЭВМ М-4030. Общая структурная схема электронного оборудования системы приведена ранее в [13]. В многоканальном варианте система расширена аналоговым коммутатором на 16 каналов 4-

канальным нормирующим усилителем, модулем программируемого генератора для подачи оператору звуковых сигналов, выходным регистром для управления автономным регулятором периода вращения внутреннего цилиндра установки, а также счетчиком для независимого ввода в ЭВМ этого параметра.

2.1. Передача данных из АЦП в память ЭВМ ведется в мультиплексном режиме, поскольку монопольный режим блокирует канал до конца накопления массива данных, делая систему недоступной для прерываний и не позволяя выводить какие-либо данные на устройства отображения, по которым можно следить за процессом. Каналы аналогового коммутатора опрашиваются последовательно с равными интервалами. Для контроля сбоев при переключении каналов применяется замкнутый на землю канал, используемый также для коррекции дрейфа нуля аппаратуры.

Ввод данных ведется последовательно в два буфера, переключаемых по мере заполнения одного из них. Пока ввод идет в один буфер, другой может подвергаться промежуточной обработке в подпрограмме пользователя, и наоборот. При малых частотах квантования (~ 256 Гц), характерных для изучаемых процессов, задержки, обусловленные запуском канальных программ, не приводят к пропускам в сигнале при переключении буферов.

Накапливаемые данные могут формироваться в виде файлов экспериментальных данных на магнитной ленте. Для этого первый блок файла является идентифицирующим. Принято, что первыми двумя словами этого блока должны быть дата проведения записи и порядковый номер эксперимента, по которым в дальнейшем ведется поиск нужной записи. Остальные слова блока служат для запоминания условий проведения эксперимента: текущего времени, номеров каналов и усиления, температуры, периода вращения и т. д. После заполнения одного из входных буферов его содержимое переписывается на ленту, образуя один из блоков экспериментального файла.

2.2. Состав сервисных подпрограмм, описанных в [14] и позволяющих пользователю организовать прерывание и ветвление программы, значительно расширен. В частности, активно используется подпрограмма типа ФЛАГ, позволяющая осуществлять ветвление основной программы в месте, где происходит обращение к ней. Подпрограмма реализует следующую простую функцию: параметр подпрограммы (простая целая переменная) имеет значение «1», если при выполнении основной программы до обращения к ФЛАГУ на клавиатуре была нажата оговоренная клавиша, и «0» в противном случае. При обычном использовании после подпрограммы ФЛАГ идет анализ ее параметра, и если он равен нулю, то продолжается нормальное выполнение основной программы, иначе организуется ветвление того или иного типа. Это дает возможность, в частности, прерывать выполнение бесконечных циклов в нужном месте, проводить выборочные распечатки или отображение данных и т. п.

Основной подпрограммой, позволяющей управлять выполнением программы пользователя, является подпрограмма типа ВЫВОД-ВВОД. В параметры подпрограммы входят текст (литеральная константа, формируемая пользователем) и имя переменной. В том месте, где имеется обращение к подпрограмме, ЭВМ выводит на экран дисплея указанный текст, текущее значение переменной и ожидает ответ оператора. Оператор в ответ может либо продолжить выполнение программы с прежним значением переменной путем нажатия клавиши «Конец сообщения», либо изменить значение этой переменной, введя соответствующее число с клавиатуры дисплея, и далее продолжить выполнение программы.

В проблемных программах широко используется внешняя память на устройствах прямого доступа — накопителях на магнитных дисках (НМД), что позволяет запоминать большую часть промежуточных вычислений и организовывать обработку длинных массивов данных. Для ускорения процедур чтения-записи на магнитный диск в системе имеется подпро-

грамма, реализующая на физическом уровне неформатированный ввод-вывод с прямым доступом через таблицу ключей.

2.3. Описанные выше подпрограммы дают возможность пользователю, владеющему программированием на распространенном языке высокого уровня (ФОРТРАН, АЛГОЛ), быстро создавать проблемные программы с широким использованием диалоговых режимов, не прибегая к помощи дефицитных системных программистов. Такая организация программного обеспечения позволяет применять терминальный комплекс не только для сбора и обработки данных в экспериментальных задачах, но и как мощное средство для решения чисто математических модельных задач [15]. Значительное ускорение решения таких задач происходит за счет оперативного вмешательства математика в ход проведения вычислительных операций, быстроты замены исходных данных, вывода основной информации на телевизионный графический дисплей, что позволяет быстрее оценить ситуацию. Система также включает редакторы символьной и текстовой информации и дает возможность пользоваться средствами операционной системы прямо с рабочего места с помощью специального каталогизированного монитрного сеанса, редактируемого на физическом уровне.

3. Программы обработки многомерной информации. 3.1. Программа, предназначенная для оценки характера гидродинамического процесса в реальном масштабе времени и записи реализаций процесса на магнитную ленту (МЛ), написана на ФОРТРАНе. Структура ее представлена на рис. 2. После загрузки программа входит в режим ВИД РАБОТЫ, реализованный с помощью оператора «вычисляемый GO TO». После отработки каждого блока программа возвращается в исходное состояние.

Первый блок программы позволяет экспериментатору оценить текущее значение числа Рейнольдса. При этом скорость вращения и температура считываются автоматически, а значение вязкости вычисляется по хранящейся в памяти ЭВМ таблице с помощью интерполяции. Во втором блоке оператор заполняет таблицу соответствия между физическими номерами датчиков сигнала и номерами каналов аналогового коммутатора. Третий блок работает как цифровой осциллограф, выводя на экран телевизионного дисплея график входных сигналов, что позволяет оценить правильность их нормировок. В четвертом блоке мгновенные значения сигналов с любых двух каналов рассматриваются как координаты точки на плоскости, так что с течением времени на экране графического дисплея образуется некоторая фазовая траектория. В случае почти периодических сигналов она позволяет судить о фазовых соотношениях, а для стохастических сигналов — получать функцию распределения.

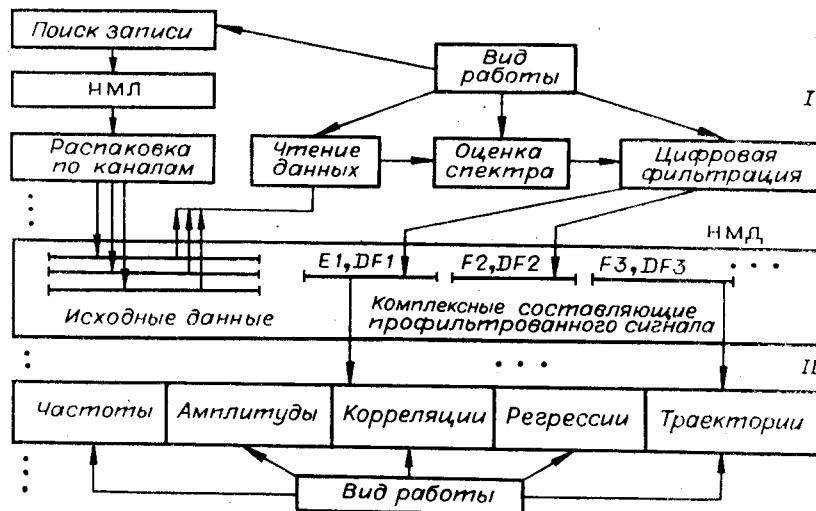


Рис. 2. Структура программ обработки записанных данных.

Пятый блок программы производит оценку спектральной плотности сигнала в выбранном канале. Этот спектр используется для определения характера сигнала, а также для выбора частотных полос при цифровой фильтрации сигнала в реальном масштабе времени.

Далее экспериментатор может сделать запись сигналов в архив экспериментальных данных, предварительно заполнив заголовок файла и задав количество блоков записи. Как правило, для записи требуется длина блока, равная 1024 отсчетам на один канал, и число блоков 16—256.

Во время эксперимента ведется протокол с помощью цифронечающего устройства ДЗМ-180. Выводятся все параметры, заносимые в заголовок файла, и при необходимости произвольные комментарии, набранные с клавиатуры дисплея.

Весь эксперимент может выполняться и по жесткой программе. Оператором задаются величина приращения числа Рейнольдса, номера описываемых каналов, количество блоков записи и частота квантования сигнала, а также время задержки между измерениями. После изменения числа Рейнольдса программа выжидает заданное время, считывает значение температуры и периода вращения, фиксирует время по машинному таймеру и производит запись сигналов на МЛ. После окончания накопления данных программа снова увеличивает число Рейнольдса и процесс повторяется до тех пор, пока не вмешается оператор.

3.2. Программа обработки записей экспериментальных данных разбита на две части, обозначенные на структурной схеме (см. рис. 2) цифрами *I* и *II*. Программа *I* осуществляет поиск нужной записи, запрашивая дату ее проведения и порядковый номер, и выводит на экран содержимое заголовка файла. Далее информация переписывается на НМД в личный рабочий файл пользователя с распаковкой данных по каналам. Затем эти данные могут быть прочитаны, и найдены их различные спектральные характеристики.

Дальнейшая программа обработки ориентирована в основном на полосовую фильтрацию сигналов и построена так, чтобы обеспечить возможность гибкого манипулирования отфильтрованными данными. Такая направленность обусловлена предыдущими исследованиями течения Куэтта, показавшими, что в фурье-представлении исходные сигналы расчленяются на отдельные пики и изменения сигналов в этих частотных полосах дают основную информацию об исследуемом процессе, т. е. являются «существенными» фазовыми переменными. После оценки спектра мощности сигнала выбираются центральная частота F и полоса фильтрации Δ . Фильтрат вычисляется путем прямой свертки с гауссовым окном, причем частота сигнала предварительно сдвигается на F умножением его на $\exp(i2\pi F)$. Комплексные составляющие фильтрата также записываются на НМД под своими ключами.

Программа *II* производит обработку этих комплексных сигналов, позволяя получить амплитуду (модуль) сигнала и его частоту. Система ключей дает возможность легко найти необходимый комплексный фильтрат и обработать его желаемым образом. В частности, отображая на дисплей амплитуду основной гармоники азимутальной волны как функцию времени, судят о достижении процессом стационарного состояния. Далее, сформировав модули отфильтрованных сигналов из разных датчиков, рассматривают их как координаты точки на фазовой плоскости. Разбивая эту плоскость на небольшие квадраты (фазовые ячейки), строят плотность вероятности пребывания фазовой точки на этой плоскости и затем анализируют ее форму для выяснения характера корреляций. Ряд предварительных результатов применения этих методов для изучения процессов образования азимутальных волн в вихрях Тейлора приводится ниже.

4. Результаты эксперимента. 4.1. Прежде всего сравним спектры сигналов, полученные электродиффузионным методом и с помощью ЛДИСа [6—9]. Основания для такого сравнения следующие. Поскольку поле скорости определяется граничными условиями прилипания на стен-

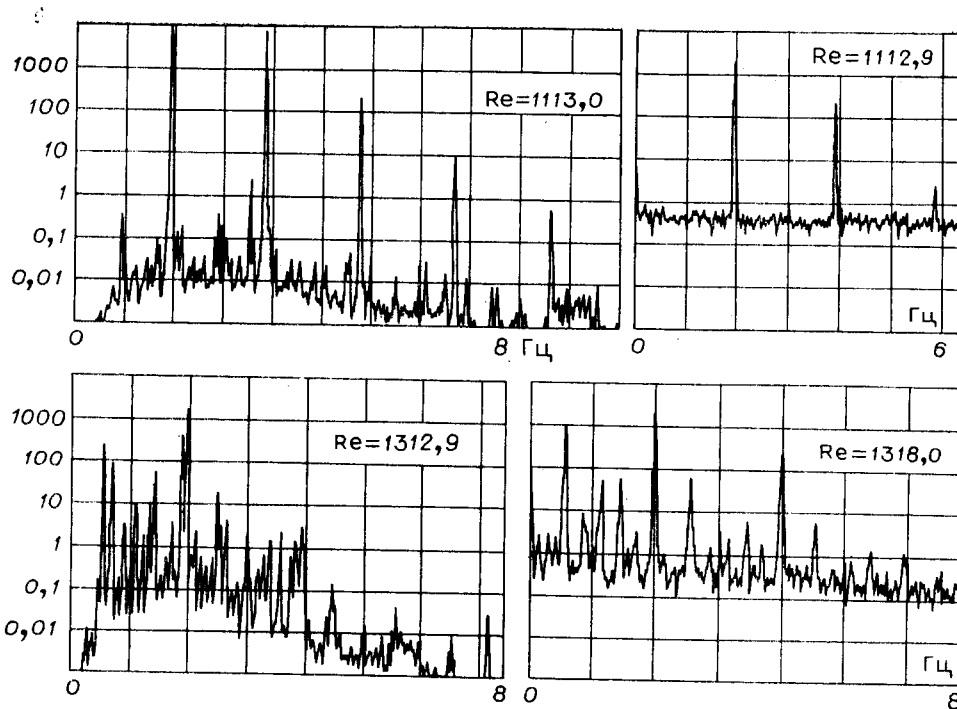


Рис. 3. Спектры электродиффузионного тока (слева) в сравнении со спектрами сигнала ЛДИСа.

ках, а первые неустойчивые моды имеют размер порядка толщины слоя, можно полагать, что изменение градиента скорости на стенке должно быть несложным образом связано с изменением амплитуды самой скорости в середине слоя. Действительно, спектры мощности сигналов, полученные двумя способами (рис. 3, ЭД-метод — слева, ЛДИС — справа) в области как малых, так и больших надкритичностей, качественно не отличаются. Существенно различается только уровень шумов, который у ЭД-сигнала почти на два порядка ниже, чем у сигнала ЛДИС. Это свидетельствует об определенном преимуществе ЭД-метода. Однако возникает ряд трудностей, связанных с дискретностью расположения датчиков. Оказывается, что функция распределения пульсаций трения на стенке имеет весьма острые пики в тех местах, где отходящая от внутреннего цилиндра струя ударяется в стенку неподвижного цилиндра (см. рис. 1).

Поэтому даже небольшая несоизмеримость шага датчиков с длиной волны вихрей Тейлора может привести к резкому различию в амплитудах измеряемого сигнала. По этой же причине наблюдается значительное различие в фазах колебаний сигнала в соседних датчиках. На рис. 4 приведены экспериментальные фигуры Лиссажу сигналов всех пар из четырех соседних датчиков с указанием направления обхода. Видно, что

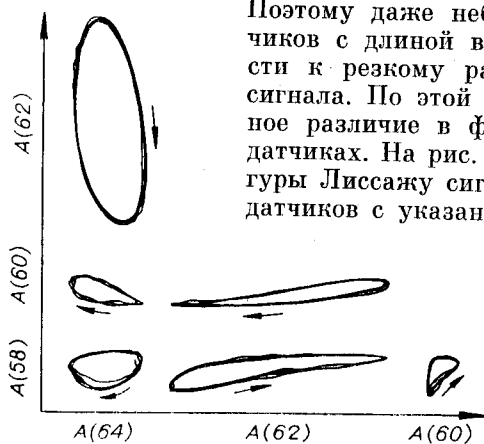


Рис. 4. Фазовые и амплитудные соотношения между сигналами с датчиков, расположенных в одной паре вихрей.

амплитуда одного из сигналов (+62) примерно в 5 раз превышает остальные, а трение в соседних датчиках (+60 и +64) колеблется почти в противофазе. Поэтому в дальнейшем ввиду несоизмеримости шага датчиков с длиной вихрей не будем обращать внимание на фазы этих «быстрых» колебаний при изучении эволюции сигналов из разных пар вихрей.

4.2. Описанная методика получения и обработки фазовых переменных была применена для изучения первой бифуркации вихрей Тейлора — процесса возникновения азимутальных волн. На рис. 5 изображены зависимости интенсивности первой гармоники азимутальной волны от числа Рейнольдса в разных точках по z , указанных на рис. 1 и принадлежащих разным парам вихрей. Эти зависимости получены путем фильтрации исходных данных на частоте 1,625 Гц в полосе 0,125 Гц с последующим усреднением по времени и вычислением дисперсии. Из рисунка видно, что интенсивность (квадрат модуля амплитуды) азимутальных волн во всем пространстве растет линейным образом в соответствии с законом Ландау, причем все прямые выходят из одной точки. Относительные дисперсии полученных точек в изображенном диапазоне чисел Рейнольдса малы, а фазовые соотношения между сигналами из разных вихрей остаются постоянными, т. е. вся система колеблется когерентно. Отсюда следует, что наблюдаемое движение в подходе фазовом пространстве (см. [9]), по-видимому, представляет собой простой предельный цикл несмотря на то, что базис этого пространства имеет сложную пространственную структуру (в виде вихрей Тейлора).

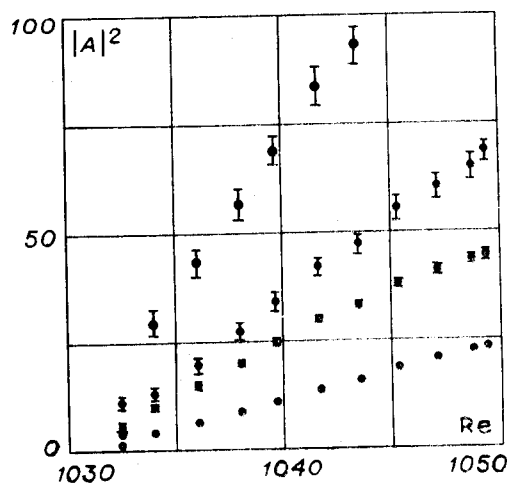


Рис. 5. Интенсивность азимутальных волн в разных точках пространства в зависимости от числа Рейнольдса.

4.3. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса, как уже было замечено ранее [6—9], происходят бифуркации, приводящие к развитию глубокой модуляции азимутальной компоненты скорости. Применение описанного комплекса средств показывает, что при этом действительно нарушается пространственная когерентность колебаний: возникают блуждания разности фаз азимутальных волн в разных парах вихрей (рис. 6). Изучению этого явления будут посвящены дальнейшие работы.

В заключение авторы выражают благодарность инициатору работы В. С. Львову за многочисленные обсуждения и полезные замечания, В. Е. Накорякову и П. И. Гешеву за помощь в адаптации электродиффузионной методики, а также В. А. Малкову за предоставление принципиальной схемы и ряда узлов ЭД-преобразователей.

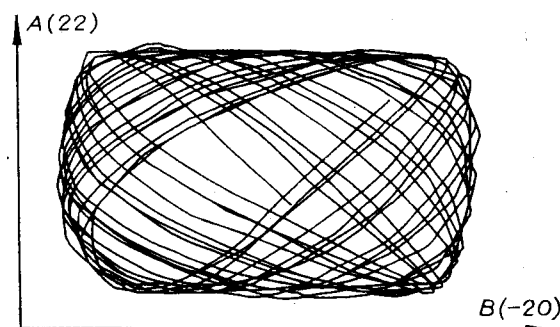


Рис. 6. Пример нарушения пространственной когерентности колебаний ($Re = 1110$): разность фаз сигналов из разных пар вихрей медленно меняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ruelle D., Takens F. On the Nature of Turbulence.— *Comm. Math. Phys.*, 1971, vol. 20, p. 167—192.
2. Мониин А. С. О природе турбулентности.— *УФН*, 1978, т. 125, вып. 1.
3. Рабинович М. И. Стохастические автоколебания и турбулентность.— *УФН*, 1978, т. 125, вып. 1.
4. Fenstermacher P. R., Swinney H. L., Gollub J. P. Dynamical Instabilities and Transition to Chaotic Taylor Vortex Flow.— *J. Fluid Mech.*, 1979, vol. 94, P. 1, p. 103—128.

5. Беляев Ю. Н. и др. Возникновение турбулентности во вращающихся жидкостях.— Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 29, вып. 6.
6. Кузнецов Е. А., и др. О проблеме перехода к турбулентности в течении Куэтта.— Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 30, вып. 4.
7. L'vov V. S., Predtechenskii A. A. On Landau and Stochastic Attractor Pictures in the Problem of Transition to Turbulence.— Physica 2D, 1981, p. 38—51.
8. Львов В. С., Предтеченский А. А. Поэтапный переход к турбулентности в течении Куэтта.— В кн.: Нелинейные волны. Горький: ИПФ АН СССР, 1980.
9. Львов В. С., Предтеченский А. А., Черных А. И. Бифуркации и хаос в системе вихрей Тейлора: натурный и численный эксперимент.— ЖЭТФ, 1981, т. 80, № 3.
10. Donnelly R. J. Experiments on the Stability of Viscous Flow between Rotating Cylinders. IV. The Ion Technique.— Proc. Roy. Soc. A, 1965, vol. 283, p. 509—519.
11. Кутателадзе С. С. и др. Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений.— Новосибирск: Наука, 1975.
12. Томсонс Я. Я., Горбачев В. М., Малков В. А. Аппаратурное обеспечение эксперимента при электродиффузионной диагностике турбулентных потоков.— В кн.: Электродиффузионная диагностика турбулентных потоков: Сб. науч. тр. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1973.
13. Журавель Ф. А., Кругляк З. Б. Аппаратные средства управления однокрейтовой системой КАМАК от ЭВМ ЕС или УВК М-4030.— Автометрия, 1980, № 4.
14. Журавель Ф. А., Кругляк З. Б. Математическое обеспечение терминального комплекса для УВК М-4030.— Автометрия, 1980, № 4.
15. Черных А. И. Численное моделирование цепочки вихрей Тейлора.— Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1981. (Препринт АН СССР, Сиб. отд-ние, ИАиЭ; № 147).

Поступила в редакцию 23 сентября 1981 г.

УДК 621.373.826.032.265

**В. П. БЕССМЕЛЬЦЕВ, В. Н. БУРНАШОВ, Л. С. ВЕРТОПРАХОВА,
Д. А. ГРИЦЕНКО, И. С. ДЕГТЯРЕВ, А. И. ЖИЛЕВСКИЙ,
Ф. И. КОКОУЛИН, Г. А. ЛЕНКОВА, А. И. ЛОХМАТОВ**

(Новосибирск)

ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЙ ЛАЗЕРНЫЙ СКАНЕР С ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ КОНТРОЛЕМ

В Институте автоматки и электрометрии СО АН СССР ведутся работы по созданию новых устройств ввода/вывода информации ЭВМ, основанных на современных достижениях электроники и лазерной технологии. Разрабатываемые устройства могут применяться для быстродействующего прецизионного сканирования объектов, считывания и регистрации черно-белого и цветного, графического или полутонного изображения.

Основным узлом разрабатываемых устройств является сканер, построенный на основе зеркального резонансного вибратора, угловые положения которого контролируются лазерным интерферометром. Такая конструкция обеспечивает более чем 10^4 разрешаемых элементов в строке с высокой точностью позиционирования при относительно низкой стоимости изготовления [1]. Применение зеркала в качестве отклоняющего элемента позволяет использовать источники света с широким диапазоном мощностей и длин волн.

Электронные узлы управления и контроля сканера выполнены в стандарте КАМАК, что значительно упрощает подключение устройства к различным типам ЭВМ и обеспечивает видоизменение его структуры.

Сканер (рис. 1) состоит из трех основных частей: зеркального дефлектора, лазерного интерферометра и электронной системы управления. Зеркало дефлектора установлено на оси электромагнитного вибратора 1 и освещается лазерным пучком, сформированным оптической системой, не входящей в состав сканера. На обратной стороне зеркала расположены уголково-призматические отражатели 2, 3, образующие плечи интерферометра.