

## ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ АНЕМОМЕТРИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ\*

УДК 537.517.4 : 532.574 : 621.375.826

Ф. А. ЖУРАВЕЛЬ, В. С. ЛЬВОВ, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН,  
А. А. ПРЕДТЕЧЕНСКИЙ, В. С. СОБОЛЕВ, Е. Н. УТКИН,  
А. И. ЧЕРНЫХ

(Новосибирск)

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПРОСТЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ

**Введение.** Одной из фундаментальных проблем гидродинамической турбулентности является проблема перехода детерминированного ламинарного течения к стохастическому, случайному. Ее можно сформулировать так: в чем причина стохастического поведения жидкости и каким образом этот факт совмещается с тем, что это движение описывается уравнениями Навье — Стокса, имеющими динамический характер?

Первые результаты в проблеме перехода к турбулентности получены в начале нашего века и связаны с исследованием простых гидродинамических систем на устойчивость. Было показано, что при увеличении числа Рейнольдса ламинарное течение жидкости становится неустойчивым, и в результате развития этой неустойчивости возникают вторичные течения, усложняющие движение жидкости. Это обстоятельство можно проиллюстрировать хорошо известным примером течения Куэтта — Тейлора между двумя коаксиальными цилиндрами. Когда скорость вращения внутреннего цилиндра мала, а внешний цилиндр покоится, течение ламинарно, при этом частички жидкости движутся по окружности; с увеличением скорости это течение теряет устойчивость, в результате чего образуются вихри Тейлора, и частички жидкости движутся по винтовым линиям в пределах каждого вихря. Это течение можно визуализировать, если подмешать в жидкость частицы алюминиевой пудры (рис. 1). При дальнейшем увеличении скорости это вторичное течение также теряет устойчивость и границы между вихрями изгибаются. Изогнутые вихри вращаются в ту же сторону, что и внутренний цилиндр. При дальнейшем увеличении скорости вращения внутреннего цилиндра течение усложняется, и, наконец, при очень больших скоростях движение становится практически турбулентным, как это видно из рис. 1 (справа).

Естественно, что прогресс в решении сформулированной выше проблемы возможен только на основе результатов тщательных экспериментальных исследований ламинарно-турбулентного перехода в достаточно простой гидродинамической системе с минимальным числом параметров и мешающих факторов. Важно, чтобы ошибки эксперимента были малыми, а применяемая методика не вносила в исследуемый поток существенных возмущений. Исходя из этих соображений нами выбрано упомянутое выше круговое течение Куэтта, а в качестве инструмента для измерений скорости — лазерный доплеровский анемометр.

Стохастический характер исследуемого явления, необходимость высокоточной стабилизации температуры и скорости вращения внутреннего

\* Основу номера составили доклады, представленные на Всесоюзном семинаре «Лазерная доплеровская анемометрия и ее применения», который состоялся 8—10 октября 1980 г. в г. Новосибирске.

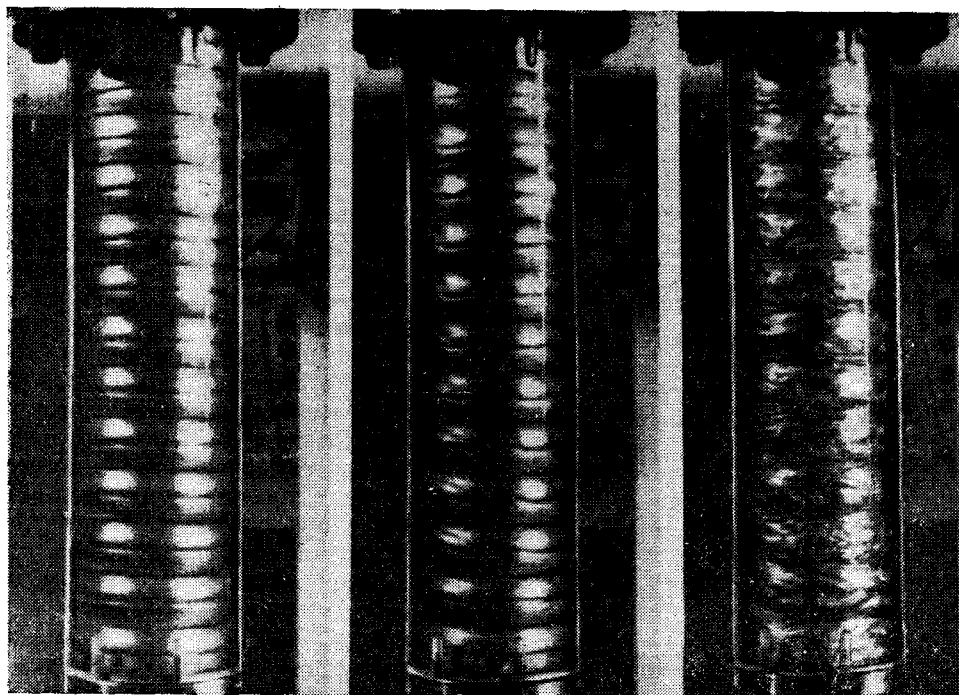


Рис. 1.

цилиндра предопределили потребность в качественной системе автоматизации эксперимента. На начальной стадии работ такая система была создана; она отвечает идеям стандарта КАМАК и базируется на ЭВМ М-4030.

**Экспериментальная установка.** Экспериментальная установка состоит из гидродинамического стенда с прецизионным приводом, лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) и автоматизированной системы сбора и обработки информации. Упрощенная структурная схема установки показана на рис. 2, а общий вид — на рис. 3.

*Гидродинамическая часть установки* представляет собой прецизионно изготовленную конструкцию, состоящую из двух коаксиальных цилиндров, внешний из которых неподвижен, а внутренний вращается двигателем постоянного тока. Его обороты стабилизированы системой автоматического управления, получающей сигналы обратной связи от индуктопина, установленного на оси двигателя. Диаметр внутреннего цилиндра 35 мм, а внутренний диаметр внешнего — 55 мм, так что между цилиндрами образуется зазор шириной 10 мм и высотой 300 мм. Оба цилиндра изготовлены с высокой точностью и отцентрированы так, что радиальные биения не превышают 5 мкм. Верхняя и нижняя крышки установки выполнены из оптического стекла. Лазерные пучки доплеровского измерителя входят через верхнее оптическое окно в зазор между цилиндрами. Область пересечения пучков, т. е. измерительный объем, может перемещаться как вдоль радиуса, так и параллельно оси цилиндров. Благодаря этому можно изучать пространственное распределение обеих компонент вектора скорости. В качестве рабочей жидкости использовалась вода и водный раствор глицерина. С целью стабилизации температуры рабочей жидкости вся установка помещена в теплоизолирующий кожух, внутри которого установлен воздушный регулятор, поддерживающий заданную температуру внешнего цилиндра с точностью 0,02 К. Температура измерялась кварцевым термометром НР-2801А.

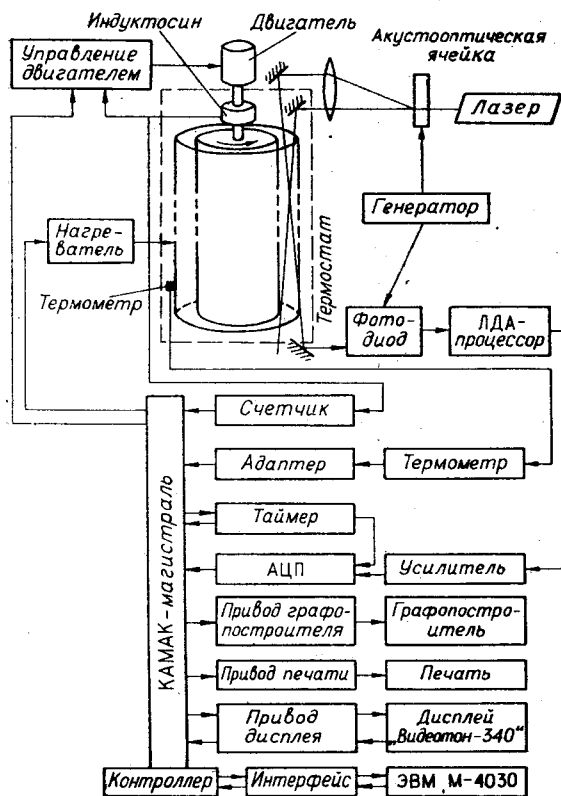


Рис. 2.

щую роль расщепителя. Ячейка построена на кристалле  $\text{TeO}_2$ , имеющем форму куба с ребром 1 см. Два пьезоизлучателя, наклеенные на двух гранях куба, создают в нем две бегущие ортогонально направленные ультразвуковые волны. Свет, дифрагируя на них, расщепляется, причем дифрагированные пучки получают смещение, равное частоте колебаний ультразвукового поля. Применение акустооптической ячейки позволило кардинально решить задачу фильтрации «пьедестала» доплеровского сигнала и работать со знакопеременным потоком. Частота возбуждения ячейки 24 МГц. Пучок нулевого порядка и дифрагированные пучки фокусируются в исследуемой области потока, образуя два интерференционных поля со взаимно-ортогональными полосами. Опорные пучки и свет, рассеянный частицами, движущимися через измерительный объем, направляются на соответствующие фотоприемники (лавинные фотодиоды). Размеры измерительного объема примерно составляют  $100 \times 100 \times 1000$  мкм. Узлы оптической развязки позволяют перемещать измерительный объем по трем ортогональным направлениям с помощью прецизионного координатного стола, на котором установлена оптическая головка. Выходные сигналы фотоприемников поступают в блок электронной обработки ЛДА. Оба электронных канала ЛДА аналогичны, поэтому на рис. 4 показана функциональная схема только одного канала. С выхода фотоприемника электрический сигнал поступает на вход усилителя высокой частоты (УВЧ) со средней частотой настройки 24 МГц. В этом усилителе происходит фильтрация шумов и постоянной составляющей сигнала фотоприемника. Затем сигнал подается на смеситель, где происходит перенос доплеровского спектра в область низких частот. В канале измерения ф-й составляющей вектора скорости преобразованная частота сигнала на выходе смесителя равна доплеровской частоте, а в канале измерения радиальной проекции вектора скорости эта частота

Система авторегулирования оборотов двигателя, вращающего внутренний цилиндр, обеспечивает стабильность 0,01% в диапазоне от 100 мс до 10 с. Период вращения  $T$  задается ручным контроллером с минимальным шагом  $0,0001T$  и измеряется электронным измерителем интервалов времени с относительной погрешностью порядка  $10^{-5}$ .

*Лазерный доплеровский анемометр.* В установке используется ЛДА, позволяющий одновременно измерять две ортогональные проекции вектора скорости. Его оптическая часть построена по схеме с опорным пучком и рассеянием вперед. Она состоит из гелий-неонового лазера, прецизионного координатного стола, узлов оптической развязки и оптической измерительной головки. Свет лазера ЛГ-38, пройдя линзу и элементы оптической развязки, попадает на акустооптическую ячейку, играющую

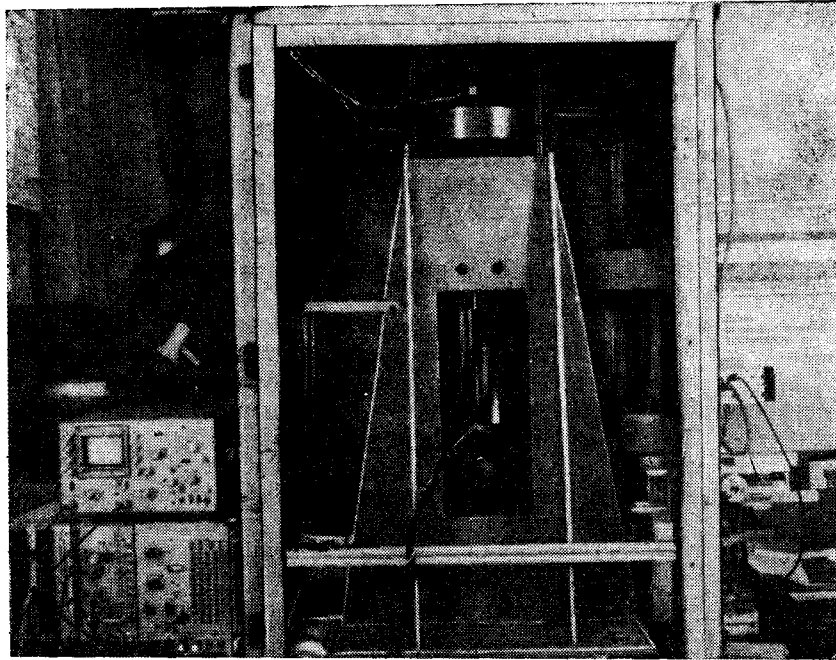


Рис. 3.

та сдвинута на заранее точно известную величину (акустооптическая ячейка и смеситель питаются от одного синтезатора частот типа ЧБ-31). Использование частотного смещения позволяет определять не только величину, но и направление измеряемой компоненты вектора скорости. С выхода смесителя сигнал подается на перестраиваемые фильтры низких (ФНЧ) и высоких (ФВЧ) частот, где происходит окончатальная фильтрация шумов и паразитных продуктов частотного преобразования. Выход фильтров подключен к процессору доплеровского сигнала. Созданный нами процессор представляет собой двухканальную систему преобразования полученного сигнала в последовательность импульсов доп-

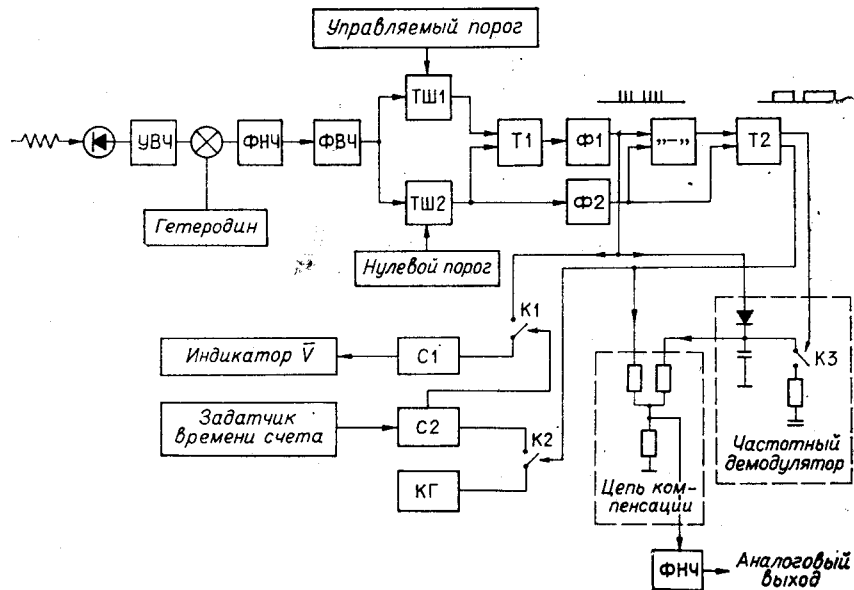


Рис. 4.

леровской частоты и стробов, отвечающих времени появления рассеивающих свет частиц в измерительном объеме или времени превышения амплитуды доплеровского сигнала заданного заранее уровня. С выхода фильтров сигнал подается на два триггера Шмидта ТШ1 и ТШ2, порог срабатывания одного из которых выбран нулевым, а второго — может устанавливаться по желанию оператора на некотором заданном уровне. Этот уровень определяется исходя из допустимого отношения сигнал — шум, который, в свою очередь, задан значениями гистерезиса ТШ1 и ТШ2. Выходные напряжения обоих триггеров Шмидта попадают на вход *RS*-триггера Т1, который формирует последовательность импульсов, аналогичную выходу ТШ1, но таким образом, что задние фронты этих импульсов совпадают с нулевыми уровнями сигнала. Далее импульсы триггеров Т1 и ТШ2 соответственно подаются на формирователи Ф1 и Ф2, которые из их задних фронтов формируют короткие импульсы постоянной амплитуды. Стандартизованные импульсы формирователя Ф1 образуют сигнальную импульсную последовательность и подаются на счетчик цифрового индикатора скорости и частотный демодулятор. Кроме того, эти же импульсы попадают на вычитающую схему и, вычитаясь из импульсной последовательности, которую туда же посылает формирователь Ф2, образуют новую разностную последовательность. Ее импульсы подаются на один из входов *RS*-триггера Т2, второй вход которого питает формирователь Ф2. На выходе Т2 образуются строб-импульсы, длительность которых строго соответствует длительности пачки импульсов сигнальной последовательности. Если формирователь Ф1 выдал, например, 5 импульсов, то длительность строб-импульса будет строго равна длительности пяти доплеровских периодов, так как триггер Т2 опрокидывается с появлением на его входе шестого импульса. Строб-импульсы также подаются на управляющие входы соответственно цифрового индикатора средней скорости и частотного демодулятора.

Цифровой индикатор средней скорости представляет собой комбинацию двух электронных счетчиков импульсов С1 и С2. База времени счетчика С1, считающего импульсы сигнальной последовательности, задается вторым счетчиком С2, в который заранее с помощью специального задатчика вручную или от ЭВМ записывают код, дополнительный к коду выбранной длительности счета. От кварцевого генератора (КГ) через ключ К2, управляемый строб-импульсами, в этот счетчик посылаются импульсы строго заданного периода. Когда они заполняют счетчик С2, он выдает импульс переноса, который выключит ключ К1 и прекратит таким образом работу основного счетчика С1. Следует заметить, что заданное время счета выбирается из длительности стробов, т. е. из тех отрезков доплеровского сигнала, при которых отношение сигнал — шум велико. Если, например, в счетчике С2 записать код, соответствующий времени счета 1 с, то этот счетчик будет давать значения доплеровской частоты; если же записать код, соответствующий коэффициенту пропорциональности между доплеровской частотой и скоростью, то индикатор в метрической системе выдаст значения скорости, осредненной за период времени, равный этому коэффициенту плюс суммарное время отсутствия сигнала. Цифровой индикатор скорости, кроме того, может измерять суммарную длительность стробов, представляя, таким образом, информацию о качестве сигнала при заданном отношении сигнал — шум. Необходимо отметить, что такой алгоритм вычисления средней скорости при исследовании турбулентных потоков и потоков с градиентом скорости дает несмещенные оценки.

Частотный демодулятор представляет собой *RC*-интегратор. Напряжение на его выходе обратно пропорционально доплеровскому периоду и, следовательно, прямо пропорционально «мгновенной» скорости потока в некоторой полосе пропускания частот пульсаций, определяемой фильтром низких частот (ФНЧ), включенным на выходе интегрирующей цепи. Чтобы интегрирующая емкость не разряжалась в те отрезки времени,

когда сигнал отсутствует или отношение сигнал — шум падает ниже заданного уровня, разрядное сопротивление  $R$  отключается с помощью ключа КЗ, управляемого строб-импульсом триггера Т2. Чтобы исключить постоянную составляющую от пульсаций частотного детектора, между ним и выходным фильтром низких частот включена цепь компенсации.

Ввод информации в ЭВМ осуществляется двумя способами. В первом из них, более простом и допускающем предварительную фильтрацию сигнала аппаратными средствами, напряжение с выхода частотного дискриминатора подается на вход 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя, выход которого соединен с магистралью КАМАК. При использовании второго способа последовательности импульсов и стробов с выхода процессора доплеровского сигнала поступают в крейт КАМАК соответственно на счетчик импульсов и измеритель временных интервалов. Каждый из этих модулей в течение задаваемых таймером периодов квантования сигналов по времени считает число импульсов и измеряет суммарную длительность стробов. Полученные коды чисел по магистрали КАМАК передаются в память ЭВМ. В темпе эксперимента машина делит эти коды друг на друга, накапливая в памяти массив значений мгновенной скорости, так как результатом деления является доплеровская частота — величина, пропорциональная скорости потока. Полученная информация является исходной для вычисления требуемых статистических характеристик скорости.

*Автоматизированная система сбора и обработки информации.* Экспериментальное исследование гидродинамической турбулентности предполагает обработку на ЭВМ больших массивов данных (желательно в реальном времени). Расчет спектров, вычисление корреляционных функций, регрессионный анализ, необходимость долговременного хранения как исходной информации, так и последующих результатов обработки, а также оперативное управление экспериментом требуют использования мощной ЭВМ. Система автоматизации, как уже упоминалось, базируется на ЭВМ М-4030 с развитой системой математического обеспечения и большой оперативной памятью. Мультипрограммный режим работы ЭВМ позволяет обеспечить ее полную загрузку фоновыми задачами во время эксперимента. Непосредственное подключение измерительного комплекса на мультиплексный канал ввода-вывода ЭВМ потребовало бы разработки специального оборудования для каждого внешнего устройства. Простым и надежным способом сопряжения эксперимента и ЭВМ является использование машинно-независимой приборной магистрали, отвечающей стандарту КАМАК и управляемой от ЭВМ. В соответствии с этим стандартом разработаны и выпускаются разнообразные измерительные и управляющие модули (аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, таймеры, счетчики, регистры и т. д.), что существенно облегчает организацию эксперимента. Управление модулями осуществляется от ЭВМ через крейт-контроллер, подключенный к ее мультиплексному каналу. Это позволяет получать информацию с нескольких измерительных устройств и выдавать результаты обработки на устройства отображения.

Используемый нами комплекс аппаратных средств состоит из 12-разрядного АЦП, подключенного к аналоговому выходу ЛДА; модулей, позволяющих регистрировать температуру стенда и периода вращения цилиндров; буквенно-цифрового дисплея «Видеотон-340» для оперативной связи экспериментатора с ЭВМ; дисплея телевизионного типа, который используется для визуализации текущей информации, например спектра мощности, вычисляемого ЭВМ в ритме эксперимента; двухкоординатного самописца, на который выводятся результаты статистической обработки данных эксперимента; устройства печати DZM-180.

Существенным элементом экспериментального комплекса является пакет прикладных программ, обеспечивающий сбор, обработку и отобра-

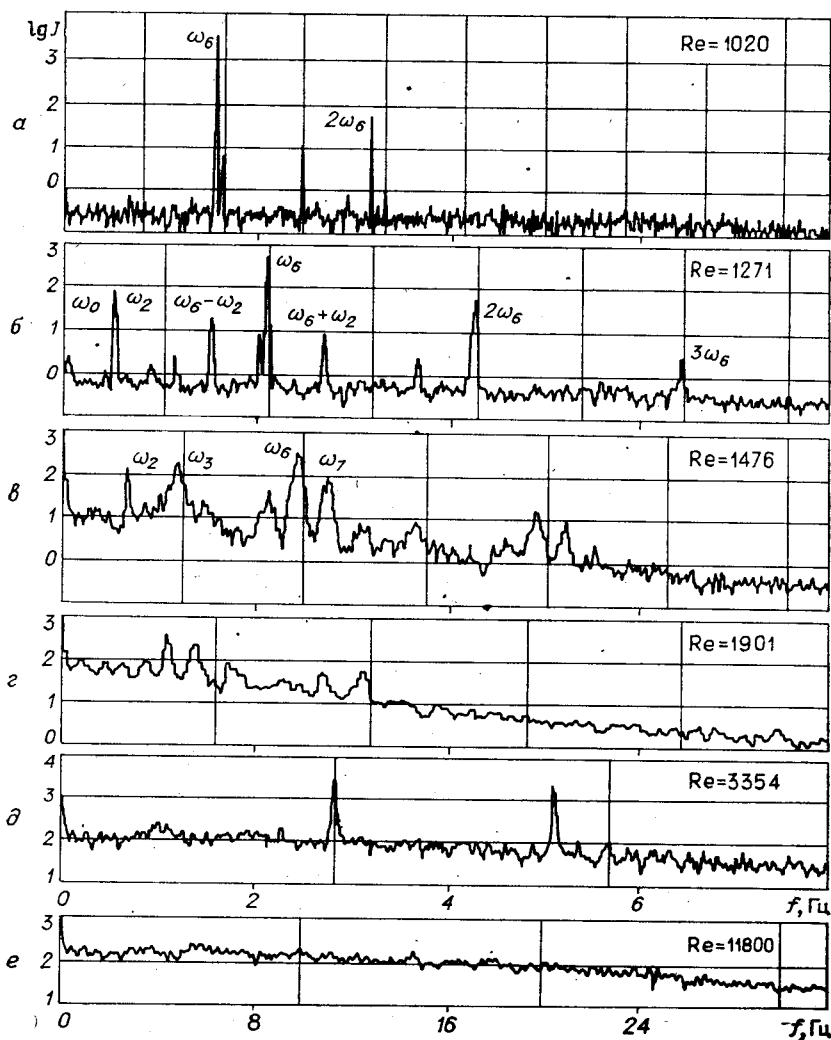


Рис. 5.

жение информации. Кроме того, система позволяет проводить запись — чтение информации на магнитофон, т. е. создавать библиотеку реализаций. Обычная реализация  $v_q(t)$  содержит от 16 до 64 тыс. отсчетов «мгновенной» скорости  $v_q(n\tau)$  с необходимым периодом квантования  $\tau = 5-100$  мс. Программа обработки информации включает в себя подпрограммы быстрого преобразования Фурье (БПФ), вычисления спектра мощности, фильтрации реализаций с необходимым частотным окном и т. д. Выбор алгоритма обработки осуществляется экспериментатором с клавиатуры «Видеотон-340» в ходе эксперимента.

**Экспериментальные результаты.** Прежде всего исследовалась эволюция спектра мощности колебаний мгновенной скорости течения при увеличении числа Рейнольдса ( $Re$ ). На рис. 5, *a-e* показана серия спектров мощности при различных  $Re$ , представленных в десятичном логарифмическом масштабе. По горизонтали отложена частота в герцах (от нуля до 8 Гц). Вертикальные линии кратны частоте вращения двигателя —  $\omega_m$ ,  $2\omega_m$ ,  $3\omega_m$  и т. д. Верхний спектр ( $Re = 1020$ ) соответствует ситуации, когда границы между вихрями Тейлора уже изогнуты, т. е. возбуждена, как говорят, азимутальная мода. Из-за вращения вихрей скорость жидкости в фиксированной точке периодически зависит от вре-

мени. Это приводит к возникновению высокого пика в спектре мощности, в тысячу раз превышающего уровень фона. Он обозначен  $\omega_6$ , поскольку на длине вихря укладывается шесть изгибов вихрей Тейлора. Справа видна его вторая гармоника  $2\omega_6$ .

При дальнейшем увеличении оборотов внутреннего цилиндра спектр флуктуаций скорости жидкости последовательно усложняется. При числе Рейнольдса 1200 возникает новое движение на частоте  $\omega_2$ . При увеличении числа Рейнольдса появляется еще одно движение на частоте  $\omega_3$  и комбинационные частоты. Все это отражает последовательное возникновение новых типов движений. Принципиально важно, что эти пики имеют конечную ширину. Это означает, что вновь возникающие движения являются не строго периодическими по времени, а уже хаотизированными. При увеличении числа Рейнольдса степень этой хаотизации постепенно растет, ширины пиков увеличиваются, и, когда их ширина сравняется с расстоянием между ними, спектр оказывается почти непрерывным. Нужно заметить, что частоты  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_6$  являются несоизмеримыми: их можно измерить с точностью до третьей значащей цифры и надежно гарантировать, что они не находятся ни в каком рациональном соотношении вида  $m/n$  при  $m$  и  $n < 20$ .

При еще большем увеличении скорости наблюдается неожиданное явление: на фоне почти сплошного спектра вновь возникают узкие пики, которые отражают возникновение регулярных движений в турбулентном потоке. При дальнейшем увеличении скорости спектр вновь оказывается сплошным, а течение жидкости — турбулентным (см. рис. 5,  $Re = 11800$ ).

Теперь рассмотрим более подробно явления, которые происходят в том диапазоне скоростей, где имеется нарушение временной когерентности в течении жидкости и возникает его стохастизация. Это происходит, как показывает эксперимент, в диапазоне чисел Рейнольдса 1000—1200 в той ситуации, где есть только один пик  $\omega_6$ . Для детального изучения этого явления был поставлен ряд экспериментов для близких чисел Рейнольдса в диапазоне 1000—1200 и по его результатам вычислен спектр с высоким разрешением (рис. 6). На рис. 6, *a* ширина  $\omega_6$ -пика равна 0,0006 Гц (на уровне 0,001 от максимума). Эта ширина обусловлена недостаточной точностью поддержания постоянства скорости вращения внутреннего цилиндра. При немного большем числе Рейнольдса (на 1%) пик имеет уже конечную ширину (0,016 Гц), обусловленную природой потока. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса в 10%-ном интервале видно, что этот пик уширяется и приобретает очень сложную тонкую структуру.

В чем причина этой стохастизации, сразу определить трудно. Поэтому был использован не только спектр, но и временная зависимость интенсивности  $\omega_6$ -движения. Для этого программным образом был создан узкополосный фильтр с полосой порядка 0,2 Гц вблизи  $\omega_6$ -пика. Сигнал с выхода этого фильтра также был протестирован программным способом. Полученная амплитуда как функция времени представлена на рис. 7. Здесь буквы *a*, *b*, *c* и т. д. в точности отвечают соответствующим спектрам. Вначале, когда спектр узкий, интенсивность  $\omega_6$ -движения от времени не зависит. Это означает, что движение является когерентным, строго предсказуемым. Потом мы видим периодическую синусоидальную модуляцию, которая сменяется глубокой хаотической модуляцией. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса эта хаотическая модуляция вновь сменяется на регулярную модуляцию, но уже не синусоидального характера. Дальше снова возникает хаотическая модуляция более сложной структуры.

По-видимому, невозможно сейчас смоделировать эти явления на ЭВМ, если исходить непосредственно из уравнений Навье — Стокса. Поэтому мы пошли по другому пути: воспользовавшись некоторыми наблюдениями общего характера, как это делал в свое время Ландау, и экспериментальными фактами, предложили феноменологическое уравнение



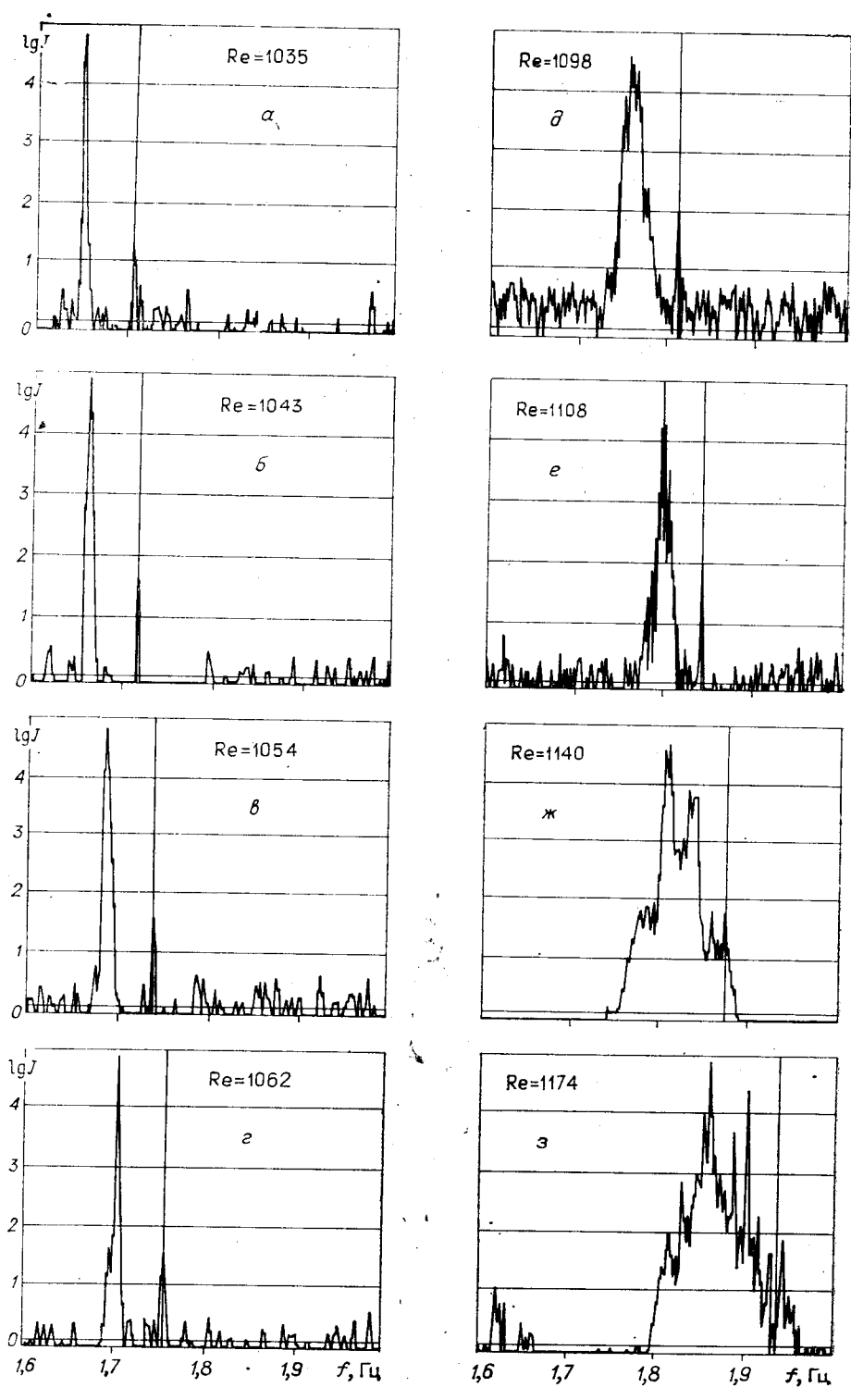


Рис. 6.

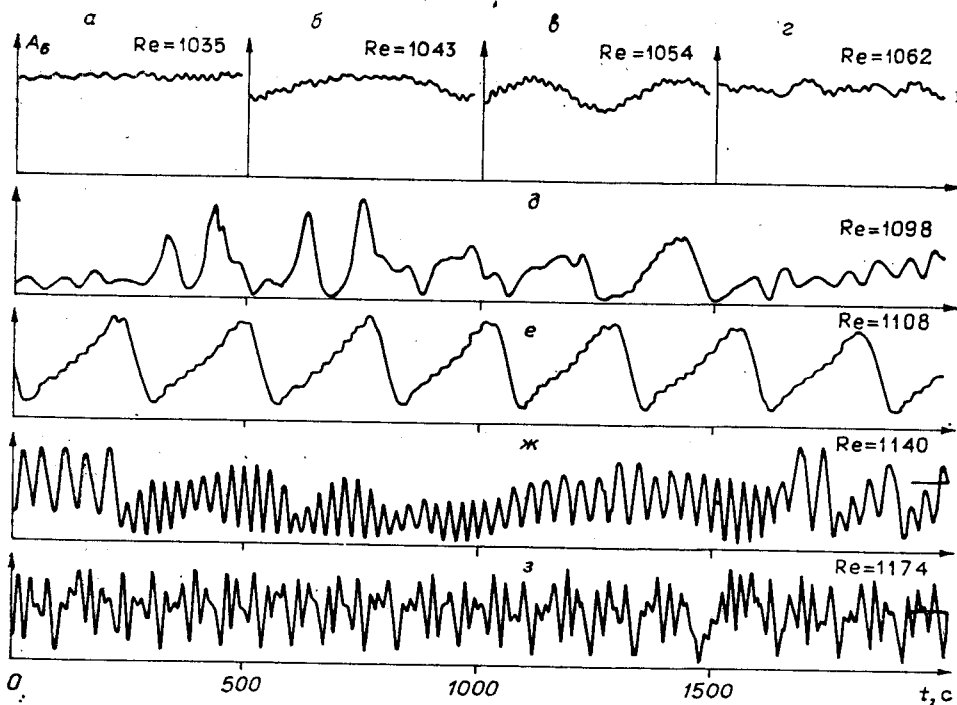


Рис. 7.

движений не для скорости жидкости  $v(r, t)$ , а для величины  $A_n(t)$ , которая представляет амплитуду изгиба границы между вихрями в паре с номером  $n$ :

$$(dA_n/dt)\gamma A_n + (iT - \eta)|A_n|^2 A_n + (a + ib/4)(A_{n+1} + A_{n-1} - 2A_n). \quad (1)$$

Скорость пары вихрей с номером  $n$

$$v_n(r, t) = A_n(t)f(r - r_n),$$

где  $f(r)$  — некоторая функция, которую можно измерить экспериментально.

Первая строчка этого уравнения в точности повторяет то уравнение, которое написал в 1941 г. Л. Д. Ландау. Здесь оставлены только, как говорят, резонансные члены, играющие максимальную роль. Если величина  $\gamma > 0$ , то уравнение описывает экспоненциальный рост изгибов, а нелинейный член останавливает этот рост. Далее приписан член, учитывающий взаимодействие между вихрями. При этом мы ограничились только членами первого порядка по амплитуде, основываясь на том экспериментальном факте, что взаимодействие пары вихрей мало. Вообще, можно исходя из первых принципов — уравнения Навье — Стокса — вычислить коэффициенты в этом уравнении. Однако возможен и другой путь — их экспериментальное измерение.

Описанным выше способом сопоставлено реальное гидродинамическое течение с системой 30 (по числу вихрей в установке) дифференциальных уравнений первого порядка по времени. Как было показано в последние десятилетия, такие простые динамические системы могут обнаруживать во времени сложное поведение, связанное с возникновением в их фазовом пространстве так называемых стохастических аттракторов (СА). СА представляет собой притягивающую область фазового пространства, внутри которой почти все траектории неустойчивы, так что движение в ней вынуждено становиться сложным, запутанным, стохастическим. Мы исследовали уравнение с помощью ЭВМ и показали, что в зависимости от соотношений между коэффициентами действительно мо-

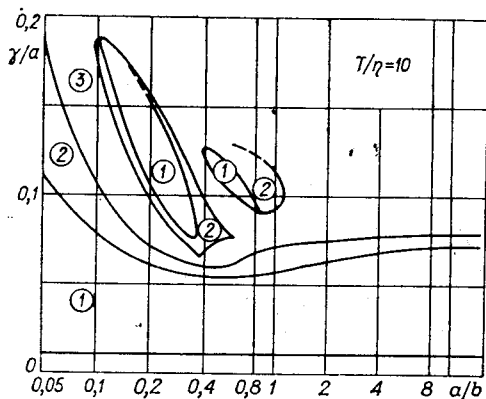


Рис. 8.

На рис. 8 на плоскости параметров системы уравнения (1) показаны области различного поведения траекторий. По оси  $x$  отложено отношение коэффициентов  $a/b$ , по оси  $y$  —  $\gamma/a$ . Область 1 — это точки покоя, 2 — область предельных циклов, 3 — стохастических автомодуляций.

Интересно отметить, что, подобрав отношение  $a/b = 0,8$ , можно при увеличении числа Рейнольдса (т. е.  $\gamma$ ) наблюдать в численном эксперименте ту же последовательность перестроек течения, что и в реальном гидродинамическом течении. Более того, можно сопоставить зависимости амплитуды от времени, полученные при численном решении нашей системы уравнений и непосредственно в эксперименте, и убедиться в их качественном соответствии. На рис. 9 представлены временные зависимости интенсивности  $\omega_0$ -движения после скачкообразного изменения числа Рейнольдса. Справа — результаты натурального эксперимента, слева — численного при  $T/\eta = 10$ ,  $b/a = 1,25$  и различных  $\gamma/a$ , соответствующих натурному эксперименту.

Таким образом, проведено сопоставление реального гидродинамического течения с феноменологической моделью — системой простых дифференциальных уравнений, в фазовом пространстве которых есть стохастический аттрактор. Можно утверждать, что переход к случайному течению жидкости объясняется именно этим обстоятельством. Непредсказуемость течения возникает по тем же причинам, по которым непредсказуемым является поведение динамической системы в стохастическом аттракторе.

Кажется парадоксальным, что простые модели гидродинамических течений представляются системой небольшого числа дифференциальных уравнений, а развитая гидродинамическая турбулентность оказывается очень сложной, и, по-видимому, в ней возбуждено очень много степеней свободы. Как же можно говорить о соответствии между простыми моделями и турбулентностью? В ответ можно сообщить следующее: то стохастическое поведение, которое возникает при промежуточных числах Рейнольдса и описывается небольшим числом переменных, конечно, является непредсказуемым, но через очень большой промежуток времени. На спектре мощности это отражается в том, что пики имеют конечную, но очень малую ширину.

Экспериментально мы показали, что по мере увеличения числа Рейнольдса увеличивается число пиков и каждый из них вносит некоторые новые степени свободы в движение. Поэтому при очень больших числах Рейнольдса, когда турбулентность является развитой, число степеней свободы действительно очень велико. Можно, воспользовавшись соображениями размерности, показать, что в пределе очень больших чисел Рейнольдса число степеней свободы увеличивается как  $Re^{9/4}$ .

В заключение следует отметить, что при изучении перехода к тур-

гут наблюдаться три разных типа поведения. Во-первых, выход на устойчивую точку, когда амплитуда как функция времени стремится к постоянной величине аperiodически (узел) или путем затухающих колебаний (фокус). Во-вторых, траектория может стремиться к замкнутой кривой — предельному циклу. При этом амплитуда как функция времени будет строго периодической. Наконец, траектория может вести себя в фазовом пространстве очень сложным образом, и характер зависимости от времени будет случайным, стохастическим.

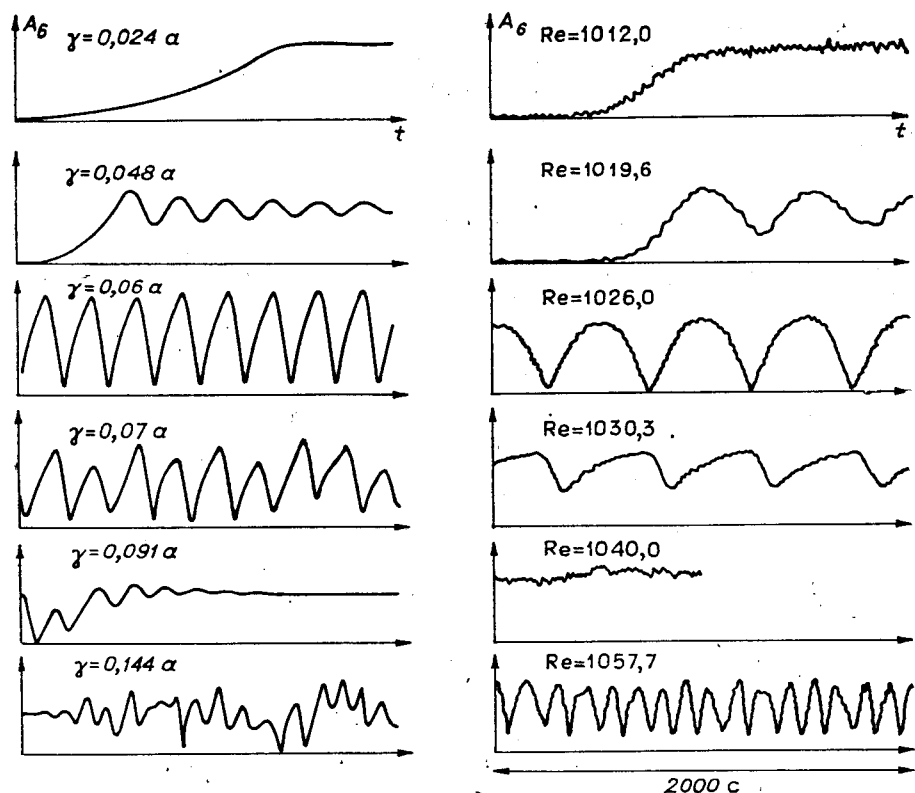


Рис. 9.

булентности уже сейчас можно достичь той глубины понимания, той степени доказательности результатов и обоснованности их, которые существуют в развитых областях физики, например в физике твердого тела. Разумеется, наша работа еще далека от этого идеала. Однако избранный путь представляется нам достаточно перспективным. Имеется уверенность, что исходя непосредственно из первых принципов гидродинамики — уравнений Навье — Стокса — можно вычислить коэффициенты в предложенной системе уравнений, найти область ее применения и структуру поправочных членов. Необходимо, по-видимому, провести гораздо более подробные экспериментальные исследования и сопоставить результаты численного эксперимента с натурным. После этого значительно больший смысл приобретут глубокие математические исследования структуры аттракторов в фазовом пространстве предложенных нами уравнений.

Поступила в редакцию 8 февраля 1981 г.

УДК 621.39.1 : 621.378 : 532.57

В. С. СОБОЛЕВ

(Новосибирск)

### ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ

Прогресс экспериментальной гидро- и аэродинамики в настоящее время связывают с развитием лазерной анемометрии. Это методическое направление, как известно [1—4], основано на выделении доплеровского сдвига частоты в свете, рассеянном на частичках, взвешенных в исследуемой среде.