

КОЛЕБАНИЯ ПОТОКА В СЛЕДАХ ЗА ДИСКАМИ И ШАРОМ

А. В. КАШКО

(Москва)

При помощи термоанемометра с постоянной температурой нити получены спектры пульсаций скорости в следах за круговыми дисками и шаром при скоростях потока от 5 до 50 м/сек. Спектры пульсаций скорости имеют хороший максимум. Приведены графики зависимости числа Струхалия, вычисленного как по диаметру тела, так и по диаметру следа, от числа Рейнольдса. При вычислении числа Струхалия за характерную частоту бралась частота пульсаций скорости, имеющих максимальную амплитуду.

Изучение следов с малыми дозвуковыми скоростями набегающего потока имеет прикладное значение в авиации, ракетной технике и космонавтике, а также при расчете некоторых конструкций.

Теоретическое исследование следов слишком затруднено в связи с тем, что даже при установившихся турбулентных движениях число неизвестных в системе осредненных уравнений больше числа уравнений. Поэтому при теоретических исследованиях часто используют некоторые результаты, полученные экспериментально.

Между числом Струхалия и числом Рейнольдса для некоторых течений существует связь. Например, при обтекании цилиндра число Струхалия остается постоянным в некотором диапазоне чисел Рейнольдса, если число Струхалия вычисляется по диаметру цилиндра и по частоте, имеющей максимальную амплитуду.

Чтобы установить закон связи между числом Струхалия и числом Рейнольдса, важно правильно выбрать характерный линейный размер L .

В случае осесимметричных тел в качестве L обычно берут диаметр тела, что, по-видимому, не всегда верно при вычислении числа Струхалия, так как тела одинакового диаметра при одинаковой скорости набегающего потока и на одинаковом расстоянии от тела могут образовывать следы, отличающиеся по диаметру в несколько раз (например, следы за диском и за шаром). Т. е. получается неполный учет формы тела в числе Струхалия: с изменением формы тела изменяется частота с максимальной амплитудой, а L остается постоянным, в то время как диаметр следа также изменяется с изменением формы тела. Представляет интерес вычисление числа Струхалия по диаметру следа, т. е. нужно отвлечься от тела генерирующего данный след, и заняться собственно следом.

Диаметр следа — понятие условное. Обычно и в теоретических и в экспериментальных работах диаметр следа определяется из условия, что на границе следа относительный дефект скорости $(u_e - u) / (u_e - u_0)$ или $(u_e - u) / u_e$ равен 0,01, где u_0 — средняя скорость на оси следа, u_e — скорость во внешнем потоке, т. е. этот диаметр определяется по величине возмущения скорости внешнего потока. Как было установлено во многих работах, например [1], радиус следа на больших расстояниях от тела пропорционален $x^{1/3}$, где ось x ось симметрии следа. Стэнтон и Маршалл [1] обнаружили за диском вихревое кольцо при $R \sim 5$, которое при $R \sim 100$ начинает разрушаться, и части жидкости, образовывавшие кольцо, одна за другой отходят вниз по потоку через определенные промежутки времени, зависящие от размеров диска и скорости течения. При больших числах Рейнольдса регулярность в перемещении завихренности исчезает (точнее, визуально не наблюдается). Разрушение вихревого кольца происходит вблизи тела и, наверное, более естественно число Струхалия вычислять по диаметру следа, измеренному в том месте, где происходит разрушение вихревого кольца, т. е. нужно связать это явление с неустойчивостью цилиндрической вихревой поверхности определенного радиуса.

Здесь проведены исследования для установления закона связи между S и R для дисков и шара.

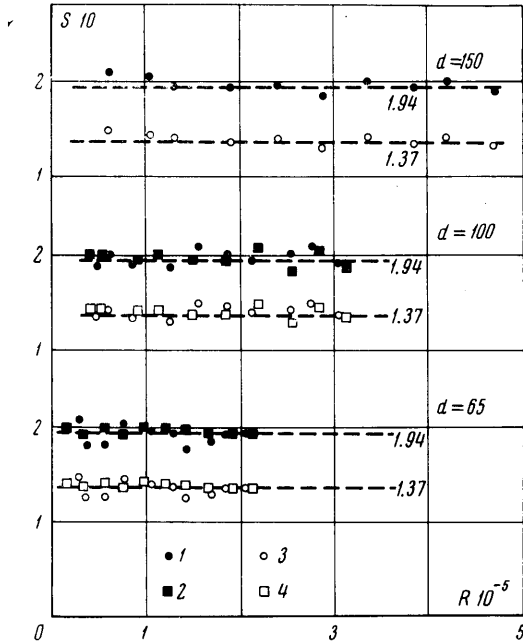
Диаметр следа определялся по максимальному значению $\partial P / \partial r$, где P — полное давление в направлении оси симметрии следа, а r — расстояние от оси симметрии. Значения $\partial P / \partial r$ вычислялись на расстоянии вниз по потоку, равном половине диаметра тела в силу указанных выше соображений. Число Струхалия вычислялось по частоте, имеющей максимальную амплитуду, и по диаметру следа, а также по диаметру тела. Число Рейнольдса определялось по диаметру тела.

Эксперимент проводился в аэродинамической трубе А-10а МГУ. Открытая рабочая часть диаметром 800 мм помещалась в герметической камере Эйфеля. Средняя скорость измерялась трубкой Пито — Прандтля, помещавшейся вверх по потоку от тела. Тела крепились на оси симметрии трубы с помощью горизонтальной державки, закрепленной на стальных растяжках.

Распределение P по радиусу следа измерялось 25 трубками Пито, соединенными с батарейным манометром.

Спектр турбулентных пульсаций скорости получался с помощью термоанемометра, работающего по методу постоянной температуры [2]. Для анализа получаемого

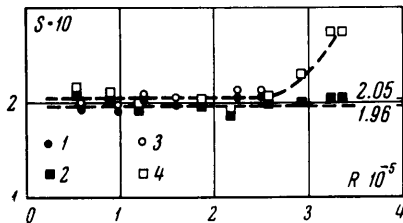
спектра применялись анализаторы спектра СИЧ, СЗЧ и С4-7; СИЧ — спектрометр инфразвуковых частот имеет частотный диапазон от 0,884 до 142,5 гц; СЗЧ — спектрометр звуковых частот, имеет частотный диапазон от 44,9 до 23000 гц. Анализатор С4-7 представляет собой селективный усилитель; изменяя ручную резонансную частоту анализатора во всем заданном диапазоне частот от 20 гц до 60 кгц можно судить о частоте и амплитуде каждого из синусоидальных колебаний, входящих в состав сложного сигнала.



Фиг. 1

Колебания исследовались в следах за круглыми дисками $d = 65, 100, 150$ мм и за шаром $d = 100$ мм. Средняя скорость потока в трубе изменялась от 5 до 50 м/сек. Спектр турбулентных пульсаций получался следующим образом: зонд термоанемометра ставился позади тела так, чтобы нить была перпендикулярна осевому направлению следа, и затем изменялась скорость в указанных выше пределах. Для каждого положения зонда бралось около 10 точек по скорости. Сигналы с термоанемометра поступали на СИЧ и СЗЧ; полученная спектрограмма фотографировалась с выдержкой 40 сек. Для проверки правильности показаний СИЧ и СЗЧ проводились те же измерения с анализатором С4-7, показания которого записывались.

Результаты эксперимента выражены в графиках в виде зависимости числа Струхала Струхала, вычисленного как по диаметру тела, так и по диаметру следа, от числа Рейнольдса, вычисленного по диаметру тела. Диаметр следа D , вычисленный по наибольшему градиенту полного давления на расстоянии $1/2d$ от тела для дисков, оставался постоянным во всем диапазоне скоростей, а отношение D/d было неизменным для всех дисков и равно ~ 1.41 . Для шара в докритической области скоростей отношение диаметра следа D к диаметру шара d на расстоянии d от центра шара вниз по потоку равно ~ 0.96 ; в начале критической области скоростей это отношение резко убывает.



Фиг. 2

В спектре турбулентных пульсаций скорости на расстоянии $1/2d$ от тела вниз по потоку частоту с максимальной амплитудой выделить труднее, чем на максимальном в нашем опыте расстоянии от тела вниз по потоку, равном $7/4 d$. Число Струхала для дисков оставалось постоянным с изменением скорости и равным ~ 0.137 , если его вычислять по диаметру тела, и ~ 0.194 , если его вычислять по диаметру следа. Для шара числа Струхала получены только в докритической и начале критической области числа Рейнольдса. В начале критической области след за шаром начинает быстро сужаться, а частота с максимальной амплитудой растет. В критической области чисел Рейнольдса измерений провести не удалось, так как след был очень узким и зонд термоанемометра нужно было крепить очень близко от горизонтальной державки, что привело бы к большим ошибкам.

Крепление шара на поперечной державке или на растяжках привело бы к другой картине обтекания шара. Как указывалось в работе [1], крепление шара на поперечной державке увеличивало сопротивление шара в закритической области в 2.5 раза (по сравнению с сопротивлением шара, укрепленного на задней державке), а добавление радиальной проволоки, закрепленной на 22.5 градуса впереди большого круга, перпендикулярного потоку, удваивает сопротивление шара, закрепленного на задней державке. Таким образом, крепление шара не должно нарушать непрерывности пограничного слоя, и было выбрано крепление на задней державке.

В докритической области скоростей число Струхала, вычисленное по диаметру шара, равно ~ 0.205 , вычисленное по диаметру следа ~ 0.196 .

На фиг. 1 для дисков и фиг. 2 для шара приведены зависимости числа Струхала S , вычисленного по диаметру следа (точки 1 и 2) и по диаметру тела (точки 3 и 4) от числа Рейнольдса R для различных расстояний l от плоскости большого круга тела вниз по потоку и для различных расстояний r от оси симметрии следа.

Приводим значения l, r в мм для экспериментальных точек на фиг. 1: точки 1 и 3 (42, 34), точки 2 и 4 (74, 34) в случае $d = 65$ мм; точки 1 и 3 (150, 68), точки 2 и 4 (175, 68) в случае $d = 100$ мм; точки 1 и 3 (150, 74) в случае $d = 150$; значения l, r в мм для экспериментальных точек на фиг. 2: точки 1 и 3 (100, 30), точки 2 и 4 (150, 28) в случае $d = 100$ мм.

Из приведенных данных на фиг. 1 и 2 видно, что числа Струхала, вычисленные по диаметру следа, для шара и дисков совпадают.

Отметим, что для диска меньшего диаметра частота с максимальной амплитудой выделяется из спектра мелкомасштабных пульсаций скорости в следе лучше, чем для дисков больших диаметров. Это частично объясняется тем, что диск большего диаметра существенно перекрывает трубу: диаметр рабочей части трубы 800 мм, а диаметр самого большого диска 150 мм.

Перемещение зонда термоанемометра поперек следа, исключая, конечно, центральную часть следа, где находилась горизонтальная державка, не приводило к существенным изменениям спектра и частоты с максимальной амплитудой. Можно сказать, что мелкомасштабные пульсации скорости однородны в указанной области поперечного сечения следа.

Перемещение зонда вдоль оси следа приводит к некоторым изменениям спектра мелкомасштабных пульсаций скорости, но частота с максимальной амплитудой не изменяется. Числа Струхала, вычисленные по диаметрам дисков, хорошо совпадают с числами Струхала, полученными в работе [3]. Некоторый разброс точек на графиках зависимости числа S от числа R обусловлен устройством анализаторов СИЧ и СЗЧ, которые имеют третьоктавные фильтры, т. е. каждый фильтр из тройки фильтров настроен на частоту в два раза большую частоты соответствующего фильтра предыдущей тройки. Таким образом, можно определить частоту с точностью до Δn , где Δn — половина частотного интервала между соседними фильтрами.

Автор благодарит за помощь Г. И. Петрова и А. М. Хазена.

Поступило 17 IX 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Modern developments in fluid dynamics. Oxford, 1943. (Рус. перев.: Современное состояние гидроаэродинамики вязкой жидкости. М., Изд-во иностр. лит., 1948).
2. Hinze I. O. Turbulence. An introduction to its mechanism and theory. New York, Mc Graw — Hill, 1959. (Рус. перев.: Турбулентность, ее механизм и теория, М., Физматгиз, 1963).
3. Kuo Y.—H., Baldwin L. V. Diffusion and decay of turbulent elliptic wakes. AIAA Journal, 1966, vol. 4, No. 9.
4. Попов С. Г. Некоторые задачи и методы экспериментальной аэродинамики. М., Гостехиздат, 1952.