

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильгамов М. А., Федяев В. Л. О стационарном движении жидкости, вызванном колебаниями цилиндра. Тр. семинара по теории оболочек, вып. 6. Казань, 1975 (Казанск. физ.-техн. ин-т АН СССР).
2. Сулейманова М. М. О перемещении деформирующегося тела вращения в вязкой несжимаемой жидкости. Изв. АН СССР, МЖТ, 1977, № 3.
3. Ильгамов М. А., Сулейманова М. М., Талдыкин М. В., Федяев В. Л. Об одной модели волнового движителя. Докл. АН СССР, 1978, т. 241, № 2.
4. Сулейманова М. М. Численное исследование нестационарного взаимодействия цилиндрической оболочки с вязкой несжимаемой жидкостью. В сб.: Статика и динамика оболочек. Тр. семинара, вып. 8. Казань, 1977 (Казанск. физ.-техн. ин-т АН СССР).
5. Алексеев С. А. Задачи статики и динамики мягких оболочек. Тр. VI Всесоюзн. конф. по теории оболочек и пластинок. М., «Наука», 1966.
6. Ильгамов М. А., Талдыкин М. В. Экспериментальное исследование одной модели волнового движителя. В сб.: Статика и динамика оболочек. Тр. семинара, вып. 8. Казань, 1977 (Казанск. физ.-техн. ин-т АН СССР).

УДК 532.517.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРИНЫ БЛИЖНЕГО ТУРБУЛЕНТНОГО СЛЕДА
ЗА СФЕРОЙ ПРИ $M_\infty = 2$, $Re_\infty = 1.5 \cdot 10^6$

Г. Б. БАРТ, И. М. ДЕМЕНТЬЕВ, В. Г. ИВАНОВ

(Ленинград)

Изложены результаты работы, целью которой являлась проверка эффективности использования коэффициента корреляции в качестве критерия для выбора эмпирического закона роста ближнего турбулентного следа за сферой при $M_\infty = 2$, $Re_\infty = 1.5 \cdot 10^6$.

Величина скорости расширения ближнего следа является важной характеристикой при построении физически обоснованной и экспериментально подтвержденной модели течения за телами, летящими со сверх- и гиперзвуковыми скоростями.

В работе [1] проведен эмпирический анализ уравнений, описывающих закон роста ближнего турбулентного следа ($M_\infty \approx 4,2$; $Re_\infty = 5.4 \cdot 10^5$; $x/d < 5$, модель — цилиндр с полусферическим затуплением, количество независимых фотографий следа — 9). Данные для анализа получены осреднением ширины следа в интервале 0.5 диаметра модели. Использовались эмпирическое и теоретическое аппроксимирующие уравнения:

$$(1) \quad W/d = A + B(x/d)^n$$

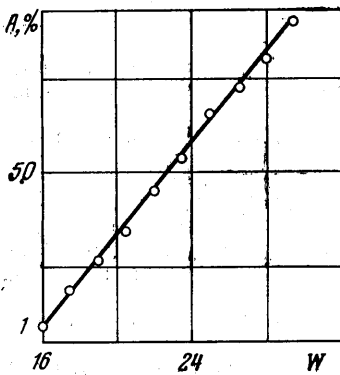
$$(2) \quad W/d = (A + Bx/d)^n$$

Для каждого значения показателя степени n вычислялись константы A и B . Далее определялся коэффициент корреляции r , характеризующий меру совпадения экспериментальных значений с соответствующим аппроксимирующим уравнением. Конечной целью анализа, проводимого авторами, явились значения n , при которых наблюдалось наилучшее совпадение, т. е. наибольший коэффициент корреляции.

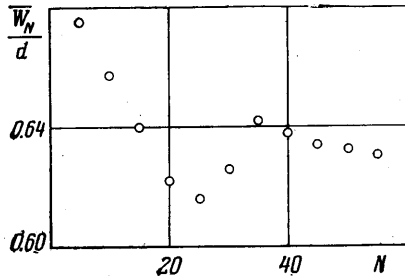
На основании полученных результатов и анализа экспериментальных данных других работ Дженкинс и Пруэтт приходят к выводу о том (см. табл. 1 в [1]), что в ближнем следе экспериментальные данные наилучшим образом аппроксимируются уравнением вида (2), при этом показатель степени $n = 2.88$ ($r_{\max} = 0.830$). Это, по мнению авторов, свидетельствует о много большей скорости расширения в этой области по сравнению с дальним следом, где значения n близки к $1/3$.

Цель данной работы — исследование ширины ближнего турбулентного следа за сферой при $M_\infty = 2$, $Re_\infty = 1.5 \cdot 10^6$ с использованием методики обработки результатов измерений, предложенной в [1]. Кроме того, представляло интерес проверить эффективность использования коэффициента корреляции в качестве критерия для выбора эмпирического закона роста ближнего следа. С целью повышения надежности получаемых результатов авторы отказались от осреднения значений ширины вдоль следа и увеличили количество независимых фотографий до 62.

Эксперименты были проведены на большой баллистической установке ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР [2]. Фотографирование модели осуществлялось теньвым



Фиг. 1

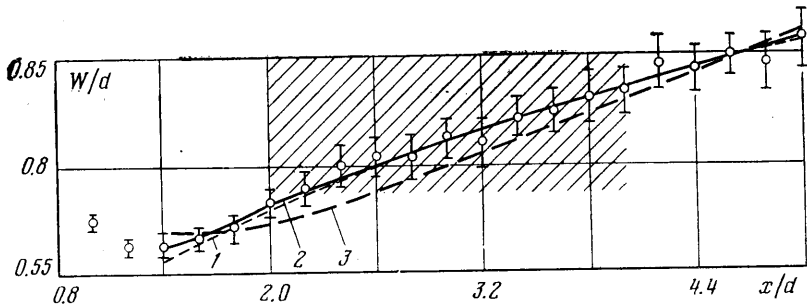


Фиг. 2

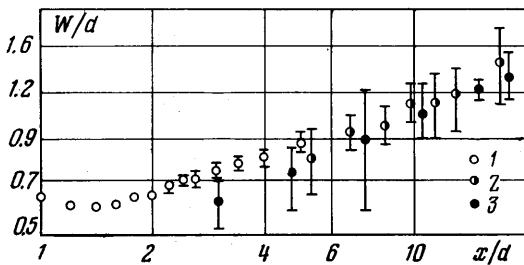
методом в параллельных лучах в двух ортогональных направлениях в пяти равноотстоящих сечениях по длине установки. Размер кадра вдоль траектории полета модели составлял 320 мм. В качестве моделей использовались сферы диаметром $d=30$ мм. Шаг измерения ширины следа составлял 6 мм. Координата x вниз по потоку измерялась от задней кромки модели, изображение которой находилось в пределах каждого кадра, с точностью ± 0.2 мм.

В работах [3-6] показано, что граница турбулентного следа может быть описана нормальным законом распределения. Однако в этих работах осреднение осуществлялось вдоль участка следа, в интервале которого предполагалась стационарность пульсаций границы. Так как в настоящей работе авторами впервые осуществлялось осреднение по реализациям, представляло интерес проверить этот вывод. На фиг. 1 приведена графическая проверка нормальности распределения ширины турбулентного следа при $x/d=3$, показывающая, что нормальное распределение может служить статистической моделью пульсаций границы турбулентного следа [7] ($A, \%$ — накопленная вероятность).

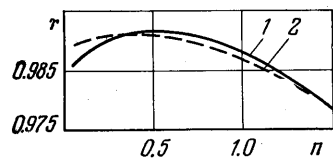
До настоящего времени проанализировано количество независимых экспериментов, которое необходимо провести для того, чтобы оценка средней ширины ближнего следа была близка к статистически точному значению. На фиг. 2 показано, как по мере увеличения количества экспериментальных данных средняя ширина стремится



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

к своему асимптотическому значению $\langle W \rangle/d \approx 0,63$, которое достигается лишь при числе экспериментов $N > 50$.

Средненные значения ширины ближнего следа, вычисленные 95%-ные доверительные интервалы и сравнение с данными других работ представлены на фиг. 3, 4. Линиям 1-3 соответствуют зависимости $W/d = 0,9392(x/d)^{0,2} - 0,4322$; $W/d = 0,2851 \cdot (x/d)^{0,5} + 0,257$ и $W/d = 0,0292(x/d)^{1,5} + 0,5658$, точками 1-3 обозначены соответственно данные авторов и взятые из [5] и [7]. Точность полученных результатов такова, что удается различить даже положение горла следа. На фиг. 3 заштрихована область, соответствующая 95%-ному доверительному интервалу для значения ширины, усредненной по следу и по 10 независимым экспериментам (аналогично методике, применявшейся в работах [5, 6, 8]).

По методике, изложенной в работе [1], был вычислен коэффициент корреляции r . Зависимость $r = r(n)$ показана на фиг. 5, где линии 1, 2 соответствуют уравнениям (1), (2). Следует отметить высокие значения r , значительно превышающие полученные Дженкинсом и Пруеттом. Однако кривые $r = r(n)$ для уравнений типа (1) и (2), во-первых, очень близки, а во-вторых, имеют слишком пологий максимум, чтобы дать достаточное основание для предпочтительного выбора вида уравнения и значения показателя степени. Иллюстрацией сказанного служит сравнение аппроксимирующих уравнений роста ширины при $n = 0,2, 0,5, 1,5$ (см. фиг. 3). Видно, что в диапазоне $x/d < 5$ эти кривые, учитывая 95%-ные доверительные интервалы, с одинаковой степенью адекватности описывают экспериментальную зависимость. В связи с этим вызывает определенное удивление, что при значении $r_{\max} = 0,830$ в работе [1] приведено значение для n с точностью до второго знака после запятой. Так как за телами, летящими со сверхзвуковыми скоростями, размер области следа, в которой расширение связано с избыточным давлением [9], слишком мал для того, чтобы коэффициент корреляции мог служить критерием для выбора эмпирической зависимости роста ближнего следа, то выводы Дженкинса и Пруетта следует считать необоснованными.

Авторы выражают искреннюю благодарность Г. И. Петрову за обсуждение и ценные советы и выражают признательность Б. М. Филиппову за помощь при проведении экспериментов.

Поступила 16 I 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Дженкинс А. Н., Пруетт С. Л. Эмпирический анализ функций, задающих закон роста турбулентного следа. Ракетная техника и космонавтика, 1970, т. 8, № 3.
2. Басаргин И. В., Дементьев И. М., Мишин Г. И. Полигон для аэродинамических исследований. В сб.: Аэрофизические исследования сверхзвуковых течений. М. - Л., «Наука», 1967.
3. Шапкер Р. Л. Исследование статистических характеристик границ высокоскоростного турбулентного следа. Ракетная техника и космонавтика, 1965, т. 4, № 11.
4. Левенштейнс, Круминс. Аэродинамические характеристики следов за телами, движущимися с гиперзвуковыми скоростями. Ракетная техника и космонавтика, 1967, т. 5, № 9.
5. Иванов В. Г., Мишин Г. И., Палкин С. Н. Исследование статистических характеристик пульсаций границы турбулентного следа за сферой, летящей со сверхзвуковой скоростью. Ж. техн. физ., 1974, т. 44, вып. 4.
6. Иванов В. Г., Кричевский Ю. Г., Мишин Г. И. Исследование статистических характеристик пульсаций границы турбулентного следа за телами различной формы, летящими со сверхзвуковой скоростью. Письма в Ж. техн. физ., 1976, т. 2, вып. 12.
7. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М., «Мир», 1973.
8. Барт Г. Б., Дементьев И. М., Иванов В. Г. Статистические характеристики границы турбулентного следа за сферой при $M_\infty = 2,4$ и $Re_\infty = 3 \cdot 10^6$. Письма в Ж. техн. физ., 1977, т. 3, вып. 24.
9. Lees L., Hromas L. Turbulent diffusion the wake of a blunt-nosed body at hypersonic speeds. J. Aerospace Sci., 1962, vol. 29, No. 8.