

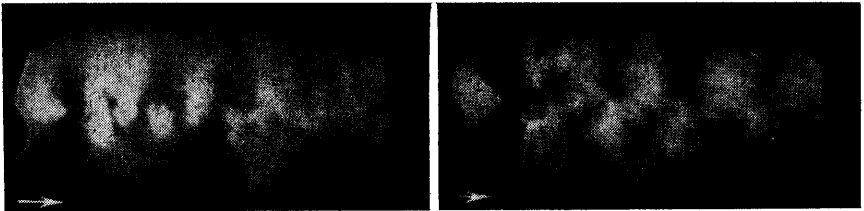
ВИХРИ В ПЛОСКОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ

О. М. КУЗНЕЦОВ, С. Г. ПОПОВ (Москва)

В последние годы опубликованы новые данные лабораторных исследований, показывающие существование дискретных вихрей за цилиндрами при различных числах Маха $M_\infty = V/a$ и Рейнольдса $R = Vd/\nu$.

Ниже описываются опыты и результаты изучения дискретных вихрей за круговым цилиндром в плоском потоке при $M_\infty < 1$ и докритических числах R , где установлены величины чисел Струхала $S_1 = nd/V$ (n — частота образующихся вихрей, d — диаметр цилиндра, V — скорость невозмущенного потока); некоторые данные получены также при $M_\infty > 1$. В меньшем интервале чисел $M_\infty < 1$ аналогичные данные были получены в работе [1]. Все линейные размеры приняты в мм, время в сек, скорости м/сек, частоты в сек⁻¹.

Опыты проводились в горизонтальной трубе прямого, кратковременного действия с закрытой рабочей частью сечением 32×25 см² и с перфорацией горизонтальных стенок, работающей от баллонов при постоянных давлениях в ресивере $p_0 > p_a$ и эжекторе $p_э > p_a$, если p_a — атмосферное давление. Моделями служили



Фиг. 1

стальные круговые цилиндры с диаметрами $d = 10, 15, 20$ мм, упирающиеся концами в противоположные вертикальные стенки рабочей части.

Величины M_∞ вычислялись обычным путем по измеренным величинам давления торможения p_0 в ресивере и статического давления p на стенках рабочей части трубы при помощи формулы адиабатического течения при $M_\infty < 1$. Величины скоростей потока V находились по известным числам M_∞ , температуре торможения T_0 , найденным отсюда статистической температуре T и скорости звука a на основе адиабатической связи T_0 и T при $M_\infty < 1$. Этим же путем определялись величина ρ , а затем и вязкость воздуха μ по известной величине T и формуле Сютерленда.

Таблица 1

Величина параметров для кругового цилиндра
 $d = 10$ мм, $h = 28$ мм

M_∞	V	l	v_B	n	S_1	$R_{10^{-5}}$
0.2	84	38.5	60	$1.5 \cdot 10^3$	0.18	0.53
0.3	100	38.5	72	$1.8 \cdot 10^3$	0.18	0.6
0.4	133	40.1	96	$2.4 \cdot 10^3$	0.18	0.96
0.5	165	38.5	124	$3.1 \cdot 10^3$	0.187	1.22
0.6	198	38.5	144	$3.6 \cdot 10^3$	0.18	1.46
0.7	223	38.5	160	$4.0 \cdot 10^3$	0.18	1.73
0.8	252	38.5	178	$4.5 \cdot 10^3$	0.18	2.15
0.9	277	38.5	210	$5.4 \cdot 10^3$	0.19	2.48

при частотах до $\sim 10^4$ сек⁻¹ и $\sim 10^5$ сек⁻¹ [3]. При этом съемка камерой СКС давала кинофильм с 16 мм либо 8 мм кадрами на длине ~ 20 м при постоянном источнике света в коллиматоре, тогда как камера СФР позволяла получить только несколько отдельных снимков за время единичной вспышки искры в коллиматоре шпирной установки.

Скорости v_B перемещения вихрей вычислялись из обработки соседних кадров кинофильмов, либо серии соседних фотоснимков на СФР с определением для фиксированного вихря его перемещения и времени по известному масштабу и частоте киносъемки n_c . Частота вихрей n вычислялась двумя способами для $M_\infty < 1$.

¹ Она отдаленно связана с настоящей работой, так как тема исследования сформулирована давно [2].

В первом — по известной скорости перемещения фиксированного вихря v_b и расстоянию l между центрами фиксированного и соседнего вихрей ряда $n = v_b/l$.

Во втором — по стробоскопическому эффекту в случае кажущейся неподвижности вихрей при проектировании фильма на экран, что показывало, очевидно, условие $n = kn_c$, где $k = 1, 2, \dots$ должно быть известно, как и n_c по измерениям.

Киносъемка вихрей за цилиндром $d = 10$ мм дала явные двухрядные вихревые дорожки с шахматным расположением вихрей при всех $M_\infty = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$. Для малых величин $M_\infty = 0.2$ и 0.3 структура дорожки не так регулярно выражена, как для больших M_∞ , если сравнивать отдельные кадры. Из отдельных лент, полученных при каждом числе M_∞ от 0.2 до 0.9 смонтирован кинофильм; при просмотре этого фильма на экране с нормальной частотой проекции впечатление при малых M_∞ получается такое же, как и при других величинах M_∞ : отчетливо видна периодичность формирования и срыва вихрей с шахматным расположением в следе цилиндра. Два кадра из кинолент приведены для иллюстрации на фиг. 1 при $M_\infty = 0.2$ и $M_\infty = 0.9$. Приближенные значения параметров, определенных из обработки киноленток, приведены в табл. 1. По сравнению с обтеканием цилиндра в несжимаемом потоке, появление сверхзвуковой зоны на боковых сторонах цилиндра принципиально не изменило основной структуры обтекания цилиндра, так как боковые скачки неустойчивы, будучи связаны с формированием вихрей [1]. Поэтому при $M_\infty < 1$ и при докритических числах R (табл. 1) выполняется приближенное условие

$$S \approx 0.2 \quad (1)$$

При $M_\infty > 1$ производились съемки обтекания цилиндров с диаметром $d = 10, 15$ и 20 мм. На фотоснимках следов за всеми цилиндрами, один из которых для $d = 20$ мм, $M_\infty = 1.75$ приведен на фиг. 2, можно видеть несколько более или менее регулярных по расположению затемнений (просветлений) с признаками шахматного порядка. Во всех этих случаях при $M_\infty > 1$ хвостовой скачок уплотнения уже не связан непосредственно с вихрями следа, как в случае $M_\infty < 1$. Однако формирование дискретных вихрей периодически, поэтому возможны малые колебания обеих ветвей хвостового скачка с частотой вихрей. По измерениям на фотографиях типа фиг. 2 из соседних пяти — семи снимков камерой СФР приближенно вычислены значения параметров, как и при $M_\infty < 1$; они приводятся ниже (число Струхала S_1 вычислено по d и S_2 — по h , взятой в начале вихревой дорожки за горловиной):



Фиг. 2

d	M_∞	V	h	l	s	t	v_b	n	S_1	S_2	$R10^{-5}$
10	1.5	430	4.0	8.5	4.5	$1.6 \cdot 10^{-5}$	277	$3.4 \cdot 10^{-4}$	0.80	0.32	2.10
15	1.5	430	4.5	9	3.6	$1.6 \cdot 10^{-5}$	225	$2.1 \cdot 10^{-4}$	0.75	0.25	3.15
20	1.75	470	10	17	10	$4 \cdot 10^{-5}$	250	18800	0.8	0.3	4.6

При этом величины чисел M_∞ , определенные соплами, вместе с вычислениями T тем же путем, что и при $M_\infty < 1$ по измеренным T_0 , позволяли найти a , а затем V . Величины скорости вихрей относительно цилиндра v_b вычислялись по измерениям перемещений s фиксированного вихря и времени t . Остальные величины находились тем же путем, как и при $M_\infty < 1$. Разумеется, результаты вычисления в табл. 2 еще более приближены, чем в табл. 1, так как фотоснимки типа фиг. 2 не дают резко очерченных конфигураций вихрей.

Итак, в следе кругового цилиндра при $M_\infty < 1$ и докритических числах R образуются дискретные вихри с почти шахматным расположением, удовлетворяющие приближенному условию (1), как и в условиях несжимаемости. При $M_\infty > 1$ за круговым цилиндром в вязком следе образуется нечто похожее на структуру при $M_\infty < 1$, но необходимы дальнейшие исследования.

Поступило 22 IV 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. N a u m a n n A., Pfeiffer N. Versuche an Wirbelstrassen hinter Zylindern bei hohen Geschwindigkeiten. Forschungsberichte Des Wirtschafts und Verkehrsministeriums Nordrhein — Westfalen, 1958, 493.
2. П о п о в С. Г. Некоторые задачи и методы экспериментальной аэромеханики, § 34, Гостехиздат, 1952.
3. К у д р я ш о в Н. Н. Киносъемка в науке и технике. Гостехиздат, 1960.