

Интересно отметить, что для эллипсов с большими осями параллельными и перпендикулярными направлению пути знаки моментов (фиг. 5) при одинаковых x_1 оказываются противоположными (очевидно, что для круглого цилиндра $C_m = 0$).

Были сосчитаны значения C_x , C_y , C_m в зависимости от одних A_1 и B_1 , т. е. путем отбрасывания членов, содержащих A_2 и B_2 . Для C_y влияние отброшенных членов оказалось довольно существенным, однако характер кривых остался тем же. Кривые C_x изменились меньше. Кривые моментов практически совсем не зависят от A_2 и B_2 . Соответствующий цифровой и графический материалы здесь не приводятся, так как они носят вспомогательный характер и, вероятно, недостаточны для обобщений.

В заключение пользуюсь случаем выразить благодарность Г. И. Верникову проведенному на ЭВМ все числовые расчеты по работе.

Поступило 19 II 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Седов Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.—Л., Гостехиздат, 1950.
2. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Изд. 4-е, ч. I. М.—Л., Гостехиздат, 1948.

О ПЕРИОДИЧЕСКОМ СРЫВЕ ВИХРЕЙ С ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА И СИЛАХ, ВЫЗВАННЫХ ЭТИМИ ВИХРЯМИ, НА ЗАКРИЗИСНОМ РЕЖИМЕ ОБТЕКАНИЯ

Л. Х. БЛЮМИНА, К. К. ФЕДЯЕВСКИЙ

(Москва)

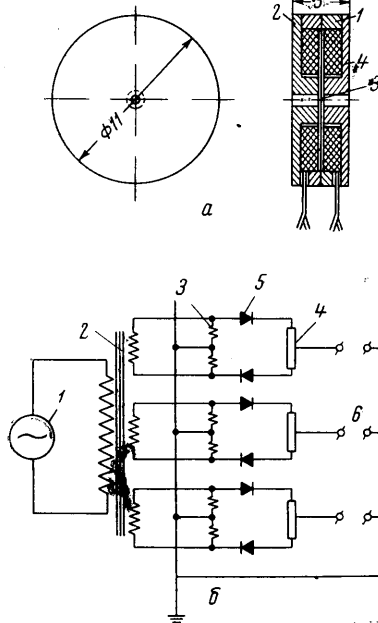
Известно, что причиной раскачки круглых цилиндрических тел является срыв вихрей. На докризисных режимах обтекания цилиндра закон срыва вихрей хорошо изучен, частота срыва вихрей носит периодический характер и удовлетворяет постоянству числа Струхала [1-3]

$$S = \frac{nd}{V} \approx 0.2, \quad R = \frac{Vd}{\nu}$$

Здесь n — частота срыва вихрей в $гц$, d — диаметр цилиндра в $м$, V — скорость набегающего потока в $м/сек$, ν — кинематический коэффициент вязкости.

Многие исследователи считают, что на закризисных режимах не наблюдается периодической частоты пульсаций скорости в следе за цилиндром и на основании этого отрицают вообще существование периодического срыва вихрей с поверхности цилиндра на закризисном режиме. Некоторые исследователи получили периодическую частоту срыва вихрей по измерениям пульсаций скорости в следе, соответствующую значениям чисел $S > 0.2$. Так, например, по опытам Делани и Соренсена при числах $10^6 < R < 4 \cdot 10^6$ значения чисел $S > 0.4$. По опытам Релфа и Симмонса в диапазоне $0.3 \cdot 10^6 < R < 0.8 \cdot 10^6$ значения чисел S непрерывно возрастают [4]. По опытам Рошко, при значениях $6 \cdot 10^6 < R < 9 \cdot 10^6$ числа S находятся вблизи 0.27 [5].

Представляют значительный интерес экспериментальные результаты по непосредственному замеру мгновенного давления на поверхности цилиндра, так как при таком методе исклю-



Фиг. 1

чается влияние турбулентного перемешивания в следе.

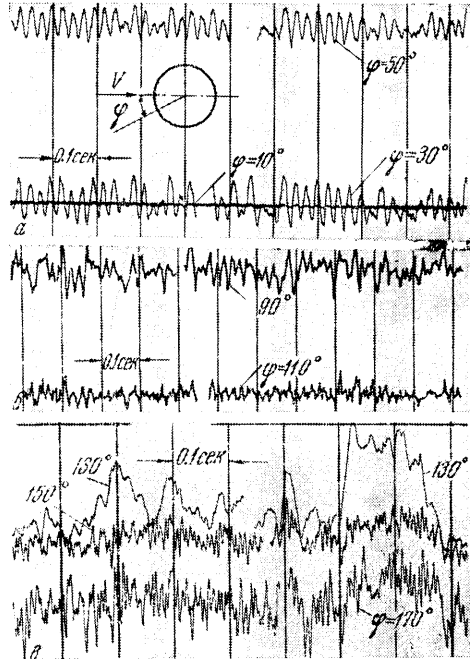
Объектами исследования были два деревянных цилиндра, один из которых имел диаметр $d = 0.16$ м, а другой $d = 0.5$ м. Оба цилиндра имели длину $l = 1.2$ м, при

этом на их торцах были укреплены шайбы диаметром 0,9 м, так что поток, обтекающий цилиндры, практически можно считать плоским. Опыты проводились в малотурбулентной ($\epsilon \approx 0,2\%$) аэродинамической трубе с открытой рабочей частью при числах Рейнольдса, изменяющихся в пределах $0,11 \cdot 10^6 \leq R \leq 1,55 \cdot 10^6$. Мгновенные пульсации давления замерялись одновременно только в трех точках среднего сечения поверхности цилиндра. Поворотом цилиндра вокруг оси на 10° последовательно замерялись давления в следующих трех точках и таким образом была охвачена одна половина поверхности цилиндра, включая точки, симметрично расположенные относительно точек с $\varphi = 20^\circ$ и 160° , т. е. точки с $\varphi = 340^\circ$ и 200° . Измерения давления проводились при помощи безынерционных индуктивных датчиков, заделанных непосредственно в поверхность цилиндра. Датчик имел цилиндрическую форму диаметром 11 мм и высотой 3 мм (фиг. 1а). Он состоял из стального корпуса — магнитопровода 2, между половинами которого зажат через кольцо 3 пермалюевая мембрана 3. На цилиндрических выступах половин корпуса насажены катушки 4. Мембране сообщается предварительное натяжение, ее прогиб, вызванный приложением давления, изменяет зазоры между мембраной и цилиндрическими выступами половин корпуса датчика, что вызывает изменение индуктивностей его катушек.

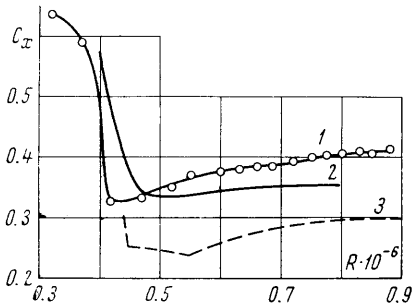
Измерительная схема (фиг. 1б) состоит из электронного генератора звуковой частоты 1, питающего через трансформатор 2 измерительные мосты. Каждый из измерительных мостов состоит из двух катушек, датчика 3 и потенциометра 4. В цепь потенциометра введены германиевые диоды 5, осуществляющие фазочувствительное детектирование. Изменение индуктивностей катушек вызывает разбаланс измерительного моста, в результате чего на его выходной диагонали появляется напряжение переменного тока. Напряжение на выходе схемы детектируется диодами 5. В качестве указательного прибора используется микроамперметр. Для регистрации применяется электромагнитный осциллограф с гальванометрами высокой чувствительности, на фиг. 1б — 6 — выходы к осциллографу.

Для примерной оценки динамической характеристики датчиков был изучен переходной процесс их работы при подаче возмущения, имеющей характер «единичной функции». Следует отметить, что в приведенных ниже осциллограммах пульсаций давления величины амплитуд колебания давления в разных точках несоизмеримы, так как по-разному загружалась чувствительность шлейфов в осциллографе. Таким образом, непосредственно по осциллограммам можно судить лишь о частоте колебаний давления, а для определения величины мгновенного давления необходимо воспользоваться тарировочными графиками.

Результаты исследования пульсаций давления на закритическом режиме в различных точках поверхности цилиндра показали, что основную частоту пульсаций давления, вызванную периодическим срывом вихрей, а следовательно, и периодическим изменением циркуляции вокруг цилиндра, воспринимают не все точки поверхности цилиндра, а только точки, расположенные до места отрыва пограничного слоя. В точках расположенных на поверхности цилиндра под углами к набегающему потоку $\varphi < 30^\circ$ периодичность мало заметна из-за ма-



Фиг. 2



Фиг. 3

лости местных скоростей. Точки, расположенные на цилиндре за местом отрыва пограничного слоя, вследствие сильного турбулентного перемешивания воспринимают не одну периодическую частоту, а целый спектр частот.

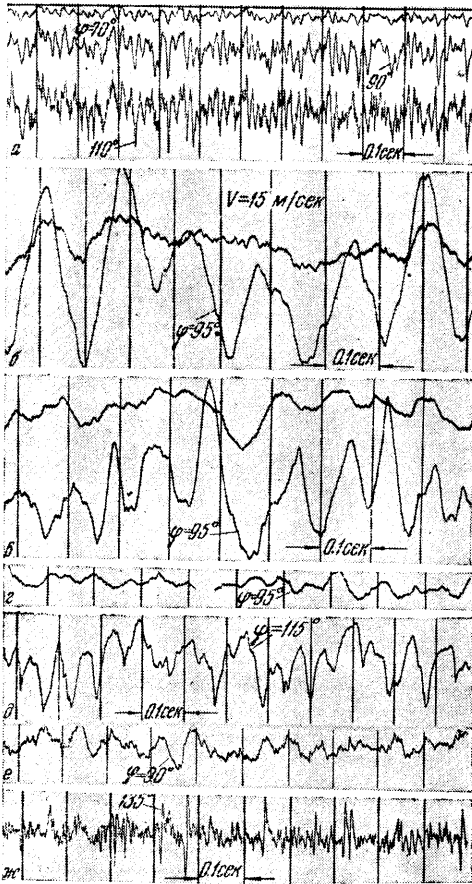
На фиг. 2 представлены осциллограммы пульсаций давления по времени в различных точках поверхности цилиндра диаметром $d = 0.16$ м при скорости потока $V = 45$ м/сек. Число Рейнольдса, подсчитанное по этой скорости и диаметру, равно $R \approx 0.5 \cdot 10^6$, что соответствует закризисному режиму обтекания цилиндра, как это видно из фиг. 3, где представлены опыты Блюминой (1), Виссельбергера (2), Делани и Соренсен (3). Из осциллограмм, представленных на фиг. 2 а и б, видна периодическая частота пульсаций давления в точках, расположенных на поверхности цилиндра под углами $\varphi = 30, 50, 90$ и 110° . Число Струхалия, подсчитанное по этой частоте, равно $S \approx 0.18$. В точке, расположенной под углом $\varphi = 130^\circ$, как видно из фиг. 2 в, выделить основную периодическую частоту невозможно. Здесь, по-видимому, наблюдается отрыв пограничного слоя, характеризуемый «всплесками», пульсаций давления по времени. В точках с $\varphi = 150^\circ$ и 170° пульсации давления носят характер обычного турбулентного перемешивания.

На цилиндре с $d = 0.5$ м были измерены пульсации давления в широком диапазоне изменения чисел R , соответствующих закризисному режиму. Так на фиг. 4 б, в, г можно видеть совершенно четко основную периодическую частоту пульсаций давления в точке, расположенной под углом $\varphi = 95^\circ$, при скоростях потока $V = 15$ м/сек, 25 м/сек и 35 м/сек, т. е. при $R = 0.52 \cdot 10^6$, $0.86 \cdot 10^6$ и $1.21 \cdot 10^6$. Число Струхалия, подсчитанное по частоте пульсаций давления в этой точке на этих скоростях, равно $S = 0.2$.

Периодическую частоту пульсаций давления можно наблюдать на фиг. 4 д в точке $\varphi = 115^\circ$ при скорости $V = 45$ м/сек ($R = 1.21 \cdot 10^6$) и на фиг. 4 е в точке $\varphi = 90^\circ$ при $V = 45$ м/сек ($R = 1.55 \cdot 10^6$). В обоих случаях число $S = 0.2$. На фиг. 4 ж в точке $\varphi = 135^\circ$ при скорости потока $V = 45$ м/сек ($R = 1.55 \cdot 10^6$) выделить основную периодическую частоту невозможно, пульсации давления здесь носят характер турбулентного перемешивания.

Следует отметить, что на фиг. 4 а приведены пульсации давления в точках $\varphi = 70, 90, 110^\circ$ цилиндра, диаметром $d = 0.16$ м при скорости $V = 54.2$ м/сек ($R = 0.6 \cdot 10^6$), число Струхалия, подсчитанное по частоте этих пульсаций, равно примерно $S \approx 0.18$.

Таким образом многочисленные исследования в малотурбулентной аэродинамической трубе пульсаций давления на поверхности двух цилиндров, в широком диапазоне изменения чисел R , показали, что на закризисном режиме обтекания цилиндра число



Фиг. 4

Струхалия, подсчитанное по частоте пульсаций, будет постоянным и равным $S \approx 0.2$.

На фиг. 5 даны значения чисел Струхалия S точками: 1 — полученные в данной работе, 2 — Блюминой и Виноградова, 3 — Петрова и Штейнберга, 4 — Бленка, 5 — Барштейна; А — кривые Релф и Симмонс, В — кривые Делани и Соренсен, С — кривые Рошко. Из фиг. 5 видно, что на закризисном режиме числа Струхалия, полученные в настоящей работе по пульсациям давления, вызванным периодическим срывом вихрей, сохраняют свою постоянную величину, равную примерно 0.2, и совпадают с кинематическими числами Струхалия, подсчитанными по частоте колебания высоких дымовых труб во время «ветрового резонанса», зафиксированных М. Ф. Барштейном.

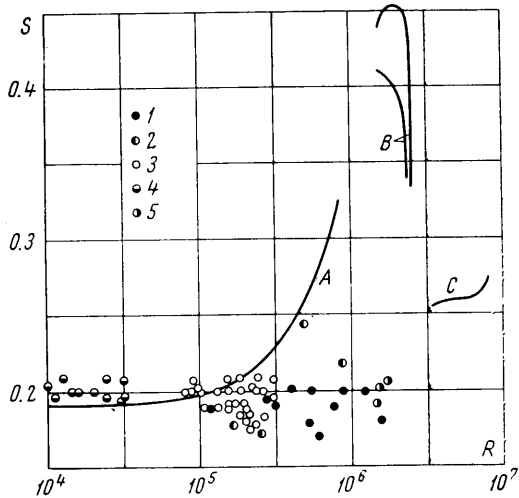
Пользуясь полученными экспериментальными значениями пульсаций давления, вызванными периодическим срывом вихрей с боковых сторон поверхности цилиндра, были подсчитаны амплитудные значения коэффициентов поперечной силы от этих вихрей на закризисных режимах.

Для определения этих сил и на докризисных режимах были проведены дополнительные опыты по замеру пульсаций давления на поверхности цилиндра диаметром 0.16 м при скорости потока $V = 25$ м/сек (фиг. 6).

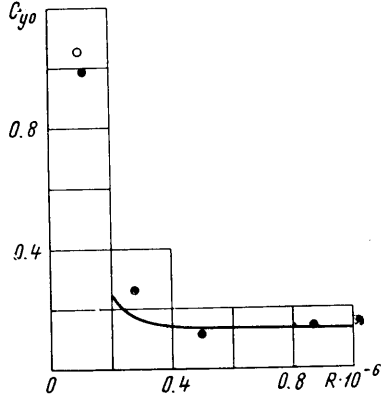
Так как мгновенные давления замерялись одновременно только в трех точках поверхности, то для подсчета поперечной силы было сделано предположение относительно фазовой зависимости пульсаций давления в различных точках поверхности цилиндра. Из рассмотрения осциллограмм пульсаций давления, полученных по

замерам одновременно в трех точках, не было обнаружено сколько-нибудь заметного сдвига фаз в пиках или впадинах пульсаций давлений в этих точках (фиг. 2, 6). Таким образом, можно сделать предположение, что возмущения или пульсации давления, вызванные срывом вихрей, распространяются столь быстро, что сдвигом фаз в пиках или впадинах пульсаций давления в различных точках нижней или верхней поверхностей цилиндра можно пренебречь. Пульсации давления на верхней поверхности цилиндра по отношению к нижней поверхности, естественно, имеют сдвиг фаз, равных π .

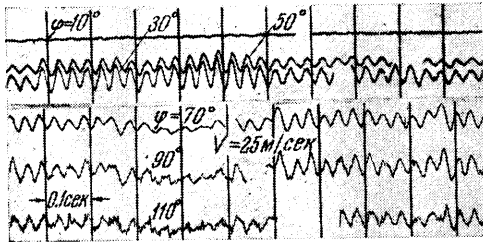
Для определения амплитудных значений коэффициента поперечной силы, действующей на цилиндр в результате периодического срыва вихрей, были рассчитаны среднеквадратичные значения разностей давлений в пиках и впадинах пульсаций давлений, замеренных в данной точке за одну секунду. При этом на закризисных режимах для расчета амплитуды поперечной силы были взяты только точки, расположенные до отрыва турбулентного пограничного слоя, так как за отрывом, как это было указано выше, невозможно выделить одну основную периодическую частоту. Давления в точках, расположенных за отрывом пограничного слоя, как будет показано ниже, не могут существенно повлиять на величину амплитуды поперечной силы, тогда как в величине продольной силы они играют существенное значение. На фиг. 7 темными точками показаны полученные по среднеквадратичным пульсациям давления значения амплитуд поперечной силы, действующей на цилиндр. Для сравнения на этой же фи-



Фиг. 5



Фиг. 7



Фиг. 6

гуре приведена экспериментальная кривая среднеквадратичных амплитуд поперечной силы, полученная Фангом [4], который непосредственно замерял эту силу при помощи тензодатчика.

Из рассмотрения фиг. 7 видно, что полученные в настоящей работе амплитудные значения поперечной силы, определенные интегрированием пульсаций давления до точки отрыва турбулентного пограничного слоя, вызванных периодическим срывом вихрей, частота которых удовлетворяет постоянству числа Струхала $S \approx 0.2$, хорошо согласуются со значениями, полученными Фангом на закризисных режимах и Дрешером [6] на докризисных (светлые точки).

Поступило 9 III 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Г. И. и Штейнберг Р. И. Исследование потока за плохообтекаемыми телами. Тр. ЦАГИ, 1940, № 482.
2. Блюмина Л. Х., Захаров Ю. Г. Колебания цилиндрических тел в воздушном потоке. Сб. «Исследование по динамике сооружений», Госстройиздат, 1957.
3. Барштейн М. Ф. Динамический расчет высотных сооружений цилиндрической формы. Сб. «Исследование по динамике сооружений», Госстройиздат, 1957.
4. Fung Y. C. Fluctuating Lift and Drag Acting on a Cylinder in a Flow and Supercritical Reynolds Number. J. Aerospace Sci., 1960, vol. 27, Num. 11.
5. Roshko A. Experiments on the Flow Past a Circular Cylinder at Very High Reynolds Number. J. Fluid Mechanics., 1961, vol. 10, pt. 3.
6. Drescher H. Messung der auf quezangestomte Zylinder ausgeübten zeitlich verändernden Drücke. Z. Flugwiss, 1956, B. 4, H. 1/2, S. 17—21.

ОБ УЧЕТЕ ДВУМЕРНОСТИ В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

А. М. КОМАРОВ (Москва)

Рассматривается развитие малых возмущений в начальном участке плоского канала. Профиль скорости основного стационарного движения жидкости существенно зависит от продольной координаты вдоль твердой стенки и задается приближенно. Задача решается в линейной постановке методом типа Галеркина.

В работе приводятся распределение энергии поля возмущений, картина линий тока и определены критические характеристики потери устойчивости. Проводится сравнение с классическими результатами Линя для течения в пограничном слое на плоской пластинке, которое считалось параллельным.

В работах по исследованию устойчивости ламинарного течения в пограничном слое на плоской пластинке основное стационарное течение предполагается существенно параллельным (см., например [1]). На самом же деле это течение не является строго параллельным. Поэтому необходимо рассмотреть течение в пограничном слое на плоской пластинке как двумерное и выяснить, как влияет на характеристики потери устойчивости зависимость течения в пограничном слое от координаты x . Самостоятельный интерес представляет также и характер развития малых возмущений не только во времени, но и по координатам в двумерном случае.

Для некоторого выяснения этих вопросов была поставлена задача об изучении развития возмущений в начальном участке плоского канала шириной $2h$, образованного двумя полубесконечными параллельными стенками. Начало оси x выбрано в середине расстояния между стенками во входном сечении. Пусть при $x = 0$ скорость по всей ширине канала одинакова и равна U_0 . На стенках должно выполняться условие прилипания $u = v = 0$ при $y = \pm h$, $x > 0$.

Пусть на это основное течение наложено двумерное нестационарное возмущающее движение, определяемое функцией тока $\psi(x, y, t)$ и давлением $p'(x, y, t)$. Как основное, так и результирующее движения жидкости считаются удовлетворяющими уравнениям Навье — Стокса. Наложенное возмущение считается малым в том смысле, что слагаемые в уравнениях Навье — Стокса для результирующего движения, содержащие произведения возмущающих величин, пренебрежимо малы по сравнению с остальными слагаемыми.

Для искомой функции $\psi(x, y, t)$ получаем в линейной постановке уравнение в безразмерной форме

$$L(\psi) \equiv \frac{\partial \Delta \psi}{\partial t} - \frac{1}{R} \Delta \Delta \psi + u \frac{\partial \Delta \psi}{\partial x} + v \frac{\partial \Delta \psi}{\partial y} + F_1 \frac{\partial \psi}{\partial y} - F_2 \frac{\partial \psi}{\partial x} = f(x, y, t) \quad (1)$$

Здесь $u(x, y)$ и $v(x, y)$ — скорости основного течения

$$F_1 = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad F_2 = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad R = \frac{\Gamma U_0 h}{\nu}$$