

УДК 532.582.31.013.2

МАХОРТЫХ Г. В., ЩЕГЛОВА М. Г.

ИНЕРЦИОННЫЕ СИЛЫ И СОПРОТИВЛЕНИЕ КРУГЛЫХ ЦИЛИНДРОВ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ В ЖИДКОСТИ

Работы по теоретическому и экспериментальному определению сил, действующих на цилиндры, ведутся достаточно давно, но полученные данные часто противоречивы и не дают ясного представления о силах и физических параметрах, определяющих их изменение. Попытки теоретического расчета сил, действующих на колеблющийся цилиндр при весьма малых числах Рейнольдса 1–100, сделаны в [1]. Некоторые экспериментальные материалы содержатся в [2], однако анализа результатов практически нет. В [3] приводятся результаты экспериментального исследования коэффициентов инерционной силы и вязкого сопротивления круглых горизонтально колеблющихся цилиндров в зависимости от числа Рейнольдса при разных значениях относительной амплитуды колебаний. Получена существенная зависимость коэффициентов присоединенной массы и сопротивления от числа Рейнольдса в диапазоне его изменения от 10^3 до 10^5 ; получены даже отрицательные значения коэффициентов присоединенной массы для некоторых значений относительной амплитуды колебаний.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования гидродинамических сил, действующих на круглый цилиндр, колеблющийся в спокойной воде поступательно и параллельно свободной поверхности. Определены коэффициенты гидродинамических сил — инерционной, пропорциональной ускорению, и вязкого сопротивления, пропорционального квадрату скорости. Показана существенная зависимость коэффициентов этих сил от безразмерной (отнесенной к диаметру цилиндра) амплитуды его колебаний в диапазоне ее изменения от 0,5 до 10. Максимальные значения чисел Рейнольдса в опытах, подсчитанные по максимальной скорости и диаметру цилиндра, составляли $2 \cdot 10^3$ – $8 \cdot 10^4$.

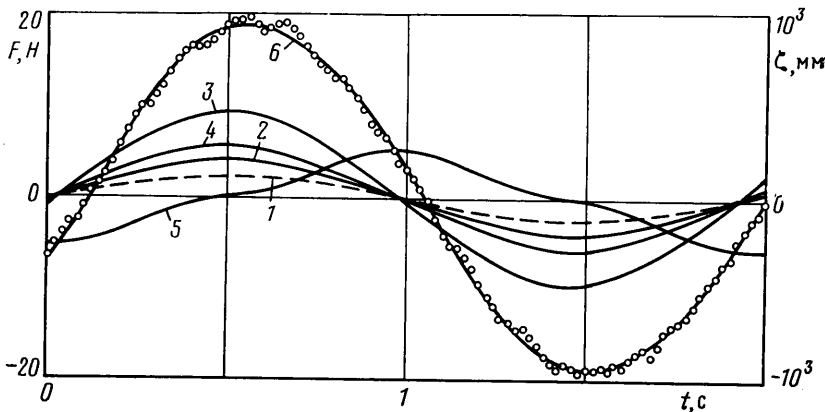
1. Методика проведения опытов и обработки результатов испытаний.

Опыты проводились на колебательной установке маятникового типа в бассейне, размеры которого значительно превосходили размеры испытуемого цилиндра. Динамометрированный цилиндр совершал вынужденные колебания практически горизонтально, параллельно свободной поверхности, расстояние до последней выбиралось таким, чтобы исключить ее влияние на измеряемые силы.

Поскольку цилиндр движется ускоренно, на него действует гидродинамическая сила, состоящая из двух слагаемых: силы сопротивления инерционного происхождения, пропорциональной ускорению цилиндра (она возникает и в идеальной жидкости), и силы сопротивления, которая возникает в вязкой жидкости и определяется скоростью тела относительно жидкости; примем эту силу пропорциональной квадрату скорости.

Если расстояние от оси вращения до центра цилиндра обозначить через l , а максимальное отклонение цилиндра от положения равновесия через a , то в момент t отклонение цилиндра и сила, действующая на него, могут быть записаны в виде $\xi(t) = a \sin \omega t$

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho d^2 L a \omega^2 \left[m^* \frac{\pi}{2} \sin \omega t - c_x \frac{a}{d} \cos^2 \omega t \operatorname{sign} \cos \omega t \right] + \left[\frac{A-G}{l} + \frac{G\omega^2}{l} \right] a \sin \omega t$$



Фиг. 1

где d и L — диаметр и длина цилиндра, ω и T — круговая частота и период колебаний, $\omega = 2\pi/T$, G и A — вес и сила Архимеда цилиндра, g и ρ — ускорение силы тяжести и плотность жидкости, $m^* = m / \frac{1}{4}\rho\pi d^2 L$ и c_x — коэффициенты инерционной силы и вязкого сопротивления соответственно. Будем считать, что коэффициенты m^* и c_x — постоянные величины, не зависящие от фазы колебания, в каждом исследуемом режиме движения.

В выражении для $F(t)$ слагаемое, стоящее в первой квадратной скобке, определяет гидродинамические силы, инерционные и вязкие, а соотношение между ними характеризует безразмерная амплитуда колебаний $a^* = a/d$. При малых a^* преобладающей в гидродинамической силе является инерционная, при больших — сила сопротивления. В опытах на колебательной установке с фиксированными амплитудами колебаний расширение диапазона изменения параметра моделирования a^* может быть достигнуто за счет изменения диаметра испытываемого цилиндра.

По полученной в опыте силе, действующей на цилиндр, можно определить коэффициенты инерционной силы и сопротивления

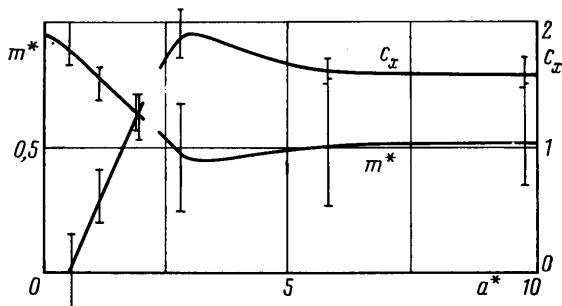
$$m^* = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho\pi^3 d^2 L a} \int_0^T F(t) \sin \omega t dt - \frac{G}{\frac{1}{4}\rho g \pi d^2 L} - \frac{A-G}{\rho\pi^3 d^2 L l} T^2$$

$$c_x = -\frac{T}{\frac{8}{3}\rho\pi d L a^2} \int_0^T F(t) \cos \omega t dt$$

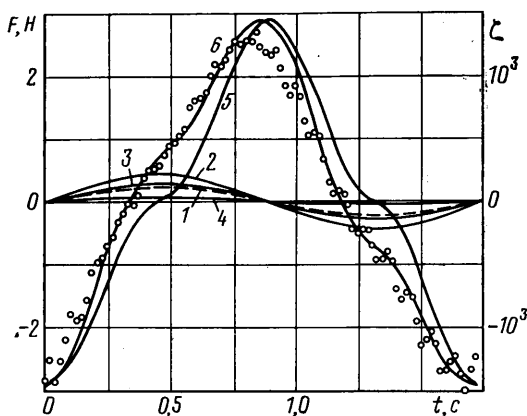
Коэффициенту сопротивления будем ставить в соответствие число Рейнольдса, подсчитанное по максимальной за период скорости цилиндра: $Re = v_{\max} d/\nu = ad\omega/\nu = 2\pi ad/\nu T$, ν — кинематический коэффициент вязкости. Следует иметь в виду, что при проведении опытов в воде нельзя одновременно сохранять одинаковыми на модели и натуре число Рейнольдса и безразмерную амплитуду колебаний, причем a^* в опытах с малыми масштабами воспроизвести достаточно легко, а число Рейнольдса — практически невозможно. Поэтому модельные опыты должны дополняться натурными данными.

Испытания проводились с двумя цилиндрами диаметром 100 и 20 мм, их удлинения равны соответственно 11,2 и 50.

Безразмерная амплитуда колебаний в первом случае изменялась в диапазоне $a^* = 0,56 - 1,96$, во втором — $2,8 - 9,8$; периоды колебаний в опытах изменялись от 1 до 2 с, числа Рейнольдса изменялись от $0,9 \cdot 10^4$ до $8 \cdot 10^4$ для цилиндра с диаметром 100 мм и от $2 \cdot 10^3$ до $1,3 \cdot 10^4$ для цилиндра с диаметром 20 мм.



Фиг. 2



Фиг. 3

Заметим, что помимо рассматриваемой тангенциальной гидродинамической силы на цилиндр действует поперечная гидродинамическая сила, связанная с несимметричным отрывом вихрей с цилиндра. (Эта сила была обнаружена и записана, например, в опытах при импульсном возникновении движения цилиндра [4].) В настоящей работе эта сила не рассматривается.

2. Результаты испытаний. Цилиндр диаметром 100 мм. Пример синхронной записи колебания цилиндра $\zeta = a \sin \omega t$ (кривая 1) и силы (точки с частотой опроса датчиков) приведен на фиг. 1 ($a^* = 1,16$). Во всех опытах сила, действующая на цилиндр, была периодической с периодом, равным периоду колебаний. Максимальное значение силы соответствовало максимальному отклонению цилиндра от положения равновесия и возрастало с увеличением амплитуды колебаний и уменьшением периода. При наименьшей амплитуде колебаний ($a^* = 0,56$) сила находилась практически в фазе с колебаниями, что свидетельствует об очень малой величине силы сопротивления; увеличение амплитуды колебаний приводило к незначительному ($1/30 - 1/20$) T отставанию силы по фазе от колебания цилиндра. Максимальная измеренная сила в опытах изменялась от 4 до 60 Н.

Определенные по опытам коэффициенты инерционной силы m^* и сопротивления c_x представлены на фиг. 2 для трех значений безразмерной амплитуды колебаний, разброс экспериментальных значений обозначен вертикальными черточками. Величины их практически не зависят от периода колебаний, а следовательно, и от числа Рейнольдса.

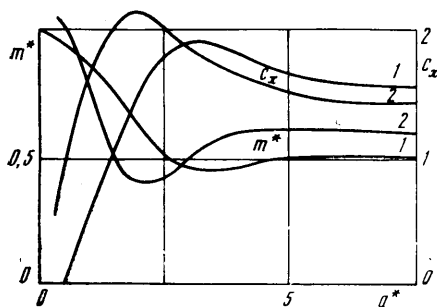
На фиг. 1 представлены также составляющие силы и суммарная сила, рассчитанные по определенным в опыте значениям m^* и c_x (кривые 2 — $G/ga\omega^2 \sin \omega t$, 3 — $ma\omega^2 \sin \omega t$, 4 — $(A-G)a/l \sin \omega t$, 5 — $1/2 c_x \rho d l a^2 \omega^2 \cdot \cos^2 \omega t \operatorname{sign} \cos \omega t$, 6 — суммарная сила).

Цилиндр диаметром 20 мм. Во всех опытах сила, действующая на цилиндр, была периодической, максимальное значение силы соответствует положению цилиндра, близкому к равновесному, т. е. сила отстает от колебания на четверть периода. Пример синхронной записи силы и колебания цилиндра при $a^* = 5,8$ приведен на фиг. 3.

Полученные в опытах с одной амплитудой колебаний и разными периодами значения коэффициента сопротивления близки между собой (фиг. 2), что свидетельствует о независимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса в рассматриваемом диапазоне его изменения.

Значительно больший разброс имеем в значениях коэффициента инерционной силы, он связан с меньшей точностью ее определения. (Инерционная сила не превышает 15% общей величины гидродинамической силы, а максимальное значение ее в опытах не превосходило 8 Н.)

На фиг. 3 представлены отдельные составляющие и суммарная сила, рассчитанные по полученным в опытах величинам m^* и c_x (обозначения такие же, как на фиг. 1).



Фиг. 4

Поскольку удлинения цилиндров различны (11,2 и 50), коэффициенты m^* и c_x пересчитаны на удлинение $\lambda = 50$ и приведены на фиг. 4 (кривые 1) в зависимости от безразмерной амплитуды колебаний. Коэффициент сопротивления пересчитывался в соответствии с кривой $c_x(\lambda)$, полученной для стационарного обтекания цилиндра [5], в коэффициент инерционной силы введена поправка Пабста на удлинение [6].

Общий анализ и сравнение с данными [7]. Коэффициент инерционной силы при малых значениях безразмерной амплитуды колебаний $a^* < 0,5$ и числа $Re = 10^4 - 10^5$ (соответствующих докритическому режиму при стационарном обтекании цилиндра) близок к теоретическому значению $m^* = 1$, полученному для цилиндра бесконечного удлинения в идеальной жидкости. С увеличением a^* коэффициент инерционной силы m^* уменьшается, достигая минимума $\sim 0,45$ при $a^* \approx 3$, и незначительно возрастает при дальнейшем увеличении безразмерной амплитуды колебаний, становясь практически постоянным и равным $\sim 0,5$ при $a^* \geq 5$. Коэффициент сопротивления при малых амплитудах колебания $a^* < 0,5$ практически равен нулю, по-видимому, отрыв потока за цилиндром на этих режимах не успевает сформироваться, а сила трения мала. С увеличением a^* c_x возрастает, достигая максимума $c_x = 1,9$ при $a^* \approx 3$, и медленно падает при дальнейшем увеличении a^* до значения $c_x \approx 1,55$ при $a^* \approx 10$. Максимальному значению коэффициента сопротивления соответствует минимум коэффициента инерционной силы.

В связи с отсутствием прямых экспериментальных данных по коэффициентам инерционной силы и сопротивления колеблющихся цилиндров проведем косвенное сравнение с результатами [7], где исследовались силы, действующие на неподвижный цилиндр в колеблющемся одномерном потоке жидкости. Следует заметить, что если неподвижный цилиндр обтекается ускоренным потоком идеальной жидкости, коэффициент c_m инерционной силы, на него действующей, равен 2 вместо $c_m = m^* = 1$ для цилиндра, колеблющегося в идеальной жидкости. Это удвоение коэффициента инерционной силы происходит за счет дополнительного действия на цилиндр силы типа Архимеда в потоке с градиентом давления, которая для цилиндра равна по величине и направлению инерционному сопротивлению. Если предположить, что равенство между этими двумя силами со-

храняется и при отрывном обтекании цилиндра вязкой жидкостью, то значение коэффициента инерционной силы можно считать равным половине значения, полученного в опытах [7] при $Re=10^3-10^4$.

Эта кривая $1/2c_m$ представлена на фиг. 4 (кривая 2). Коэффициенты вязкого сопротивления должны быть близкими для цилиндра, колеблющегося в неподвижной жидкости, и для неподвижного цилиндра в колеблющейся жидкости при равенстве кинематических параметров колебания цилиндра и параметров колебаний жидкости. Зависимость $c_x(a^*)$, полученная в [7], тоже приведена на фиг. 4 (кривая 2).

Кривые $m^*(a^*)$ и $c_x(a^*)$, полученные в настоящих опытах, и кривые $1/2c_m(a^*)$ и $c_x(a^*)$, полученные по данным [7], близки как по характеру изменения в зависимости от относительной амплитуды колебаний, так и по величине экстремальных значений и значений при больших a^* . Различаются кривые только положением экстремума $m^*(a^*)$ и $c_x(a^*)$: экстремум кривых [7] расположен при $a^*\approx 2$ вместо $a^*\approx 3$ в настоящих опытах. Это различие может объясняться разной шероховатостью поверхности испытываемых цилиндров, которая влияет на формирование вихрей за цилиндром, их последующую перестройку и отрыв (о влиянии шероховатости смотри, например, [4, 8]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Херлбат, Сполдинг, Уайт. Численное исследование двумерного ламинарного обтекания колеблющегося в равномерном потоке цилиндра // Теорет. основы инж. расчетов. 1982. Т. 104. № 2. С. 180-189.
2. Хэмман, Далтон. Силовое воздействие на цилиндр, совершающий синусоидальные колебания в воде // Конструирование и технология машиностроения. 1971. № 4. С. 320-326.
3. Garrison C. J., Field J. B., May M. D. Drag and Inertia Forces on a Cylinder in Periodic Flow, Waterway Port Coast and Ocean Div. Proc. Amer. Civ. Eng. 1977. V. 103. № 2. P. 193-204.
4. Огнев В. И., Щеглова М. Г. Гидродинамические силы, действующие на цилиндр, импульсно приведенный в движение // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 3. С. 155-159.
5. Прандтль Л., Тигъенс О. Гидро- и аэромеханика: Пер. с нем. Т. 2. М.; Л.: ГТТИ, 1935. 283 с.
6. Римап И. С., Крепс Р. Л. Присоединенные массы тел различной формы // Тр. ЦАГИ. 1947. Вып. 635. С. 1-45.
7. Сарпкава Т. Forces on Cylinders and Spheres in a Sinusoidally Oscillating Fluid // J. Appl. Mech. 1975. V. 42. № 1. P. 32-37.
8. Сарпкава Т., Collins N. J., Evans S. R. «Wave Forces on Rough Walled Cylinders at High Reynolds Numbers // 9th Annu. offshore Technol. Conf., 1977. Houston. Tek., 1977. № 3. P. 175-184.

Москва

Поступила в редакцию
9.III.1988